



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Civil

Punçoamento cíclico de lajes fungiformes reforçadas com pré-esforço transversal

Marta Alexandra da Silva Luís

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção
do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Doutor António Pinho Ramos

Júri:

Presidente: Doutor Corneliu Cismasiu

Vogais: Doutor José Manuel Matos Noronha Camara
Doutor Válder José da Guia Lúcio
Doutor António Pinho Ramos

Lisboa

2010

Punçoamento cíclico de lajes fungiformes reforçadas com pré-esforço transversal

Resumo

Apresenta-se neste trabalho uma descrição do estudo experimental realizado em modelos de laje fungiforme maciça de betão armado à escala reduzida, para estudo da técnica de reforço com recurso a parafusos pré-esforçados pós-instalados. Nesta campanha experimental foram executados e ensaiados cinco modelos. Quatro destes modelos foram reforçados com a introdução de parafusos verticais pré-esforçados, enquanto que o restante foi utilizado como modelo de referência não reforçado. Como objectivos, este estudo pretendia verificar as alterações de comportamento, modo de rotura e resistência, entre ensaios com carregamento monotónico e cíclico. Dois dos modelos reforçados com parafusos verticais foram sujeitos a carregamentos crescentes monotónicos até ser atingida rotura por punçoamento, enquanto que os outros dois foram sujeitos a carregamentos cíclicos.

Os ensaios foram realizados em duas fases distintas. Numa primeira fase, os modelos foram carregados até se atingir um estado de fendilhação considerável (correspondente a cerca de 60% da carga de rotura do modelo de referência). Seguidamente os modelos eram reforçados através da colocação de 16 parafusos transversais, dispostos em duas camadas em torno do pilar, sendo posteriormente incrementada a carga vertical até à rotura.

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os valores previstos usando o preconizado pelo CEB-FIP Model Code 1990, o EC2 e o ACI318-08.

Cyclic Punching of flat slabs strengthened with transverse prestressing

Abstract

This work presents a description of the experimental study performed on reinforced concrete flat slab reduced scale models, to study the technique of strengthening using post-installed prestressed bolts. Five models were made and tested. Four of these models were strengthened with the introduction of prestressed vertical bolts, while the remainder was used as a reference monotonic model. As objectives, this study wants to determine changes in behavior, mode of failure and resistance between tests with monotone and cyclic loading. Two of the models with strengthening vertical bolts were subjected to monotonic increasing loads until it reached the punching failure, while the other two were subjected to cyclic loads.

The tests were conducted in two distinct phases. Initially, the specimens were loaded until they reach a state of considerable crack (corresponding to about 60% of the failure load of reference model). Then the models were strengthened through the use of 16 cross bolts, arranged in two layers around the column, and then the vertical load was increased the vertical load until failure.

The experimental results are compared with the predicted values using the recommended by CEB-FIP Model Code 1990, the EC2 and the ACI318-08.

Palavras chave

Punçoamento

Laje fungiforme

Reforço

Betão armado

Parafusos

Cíclico

Monotónico

Key words

Punching

Flat slab

Strengthening

Reinforced concrete

Bolts

Cyclic

Monotonic

Agradecimentos

Ao Prof. António Pinho Ramos pela oportunidade e por toda a ajuda ao longo deste trabalho. Aprendi muito graças a si e sem a sua contribuição este trabalho não teria sido possível.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pelos meios colocados à minha disposição.

Aos Srs. José Gaspar e Jorge Silvério pela importante ajuda no laboratório, no decorrer dos ensaios experimentais.

À empresa de pré-fabricados, Concremat, pela produção dos modelos utilizados nos ensaios experimentais e sobretudo pela disponibilidade demonstrada.

Ao Sr. Fernando Alves pela elaboração dos parafusos.

A todos os que fizeram parte do meu caminho durante esta experiência, especialmente à minha família e aos meus amigos: muito obrigado.

Notação

b_x	dimensão do perímetro crítico na direcção x
b_y	dimensão do perímetro crítico na direcção y
d	altura útil da laje
f_{be}	tensão inicial dos parafusos
f_c	tensão de rotura por compressão da carote
f_{ccm}	tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
f_{cd}	valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ck}	tensão característica de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
f_{cm}	tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
f_{ctk}	tensão característica de rotura à tracção do betão
f_{ctm}	tensão média de rotura à tracção do betão
$f_{p0.2}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% do aço
f_{sy}	tensão de cedência do aço
$f_{sy,ef}$	tensão efectiva de cedência do aço
f_{syd}	valor de cálculo da tensão de cedência do aço
$f_{syd,ef}$	valor de cálculo da tensão efectiva de cedência do aço
f_{syk}	tensão característica de cedência do aço
f_{su}	tensão de rotura à tracção do aço
f_{ywd}	valor de cálculo da tensão de cedência das armaduras de esforço transversal
$f_{ywd,ef}$	valor de cálculo da tensão efectiva de cedência das armaduras de esforço transversal
h	altura da laje
r	largura do pilar central onde é aplicada a força
s	espaçamento entre as armaduras
s_r	afastamento radial entre camadas de armadura
u, u^*	perímetro do contorno de referência
u_0	perímetro da área carregada
A_c	área transversal da laje
A_s	área de armadura ordinária
A_{sw}	área transversal da armadura específica de punção
$A_{sw,a}$	área transversal de um perímetro de armaduras específicas de punção em torno do pilar
$A_{sw,b}$	área transversal de um parafuso de reforço
A_0	área transversal do pilar ou zona carregada
B	largura do pilar ou área carregada
E_c	módulo de elasticidade do betão
E_s	módulo de elasticidade do aço
$F_{p0.2}$	força limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos

F_u	força de rotura à tracção do aço dos parafusos
N_{Ed}	esforço axial actuante
S_0	secção transversal dos parafusos na zona central sem rosca
V_c	contribuição para a resistência ao punçoamento do betão
V_{dow}	efeito de ferrolho
V_{eff}	força efectiva de punçoamento
V_{exp}	valor experimental da carga de rotura
V_{prt}	projecção vertical da força nos cabos de pré-esforço
V_{Rd}	valor de cálculo do esforço resistente de punçoamento
$V_{Rd,c}$	valor de cálculo da tensão de resistência ao punçoamento sem armadura específica
V_{Rm}	valor médio do esforço resistente ao punçoamento
$V_{Rm,f}$	valor médio da carga de rotura à flexão
V_S	representa a contribuição dos parafusos no punçoamento resistente
V_{sd}	valor de cálculo do esforço de punçoamento actuante
V_{sti}	força vertical nas armaduras específicas de punçoamento

α	ângulo formado pelas armaduras específicas de punçoamento com o plano da laje
β_c	quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar
ϵ_{scr}	extensão correspondente ao início da fendilhação
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	extensão máxima
$\epsilon_{m\acute{e}d}$	extensão média
\varnothing_s	diâmetro dos varões
γ	peso volúmico do betão
γ_c	coeficiente de segurança do betão
γ_s	coeficiente de segurança do aço
ν	coeficiente de Poisson
ρ	percentagem geométrica de armadura
ρ_x	percentagem geométrica de armadura na direcção x
ρ_y	percentagem geométrica de armadura na direcção y
$\sigma_{p0.2}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos
σ_s	tensão de tracção na armadura ordinária
σ_u	tensão de rotura à tracção média dos parafusos

ACI	American Concrete Institute
CEB	Comité Euro-International du Béton
FIB	Fédération Internationale du Béton
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte
REBAP	Regulamento de Estruturas em Betão Armado e Pré-esforçado

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Aspectos gerais	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização da dissertação	3
 Capítulo 2 – Estado da arte	 5
2.1 Introdução	5
2.2 Mecanismo de rotura ao punçoamento	6
2.3 Técnicas de reforço de lajes fungiformes ao punçoamento	8
2.3.1 Armaduras transversais	8
2.3.2 Espessamento da laje	9
2.3.3 Maior secção do pilar	9
2.3.4 Adição de capitel de betão	9
2.3.5 Adição de capitel metálico	10
2.3.6 Utilização de FRP	10
2.4 Ensaaios experimentais	11
2.4.1 Ghali (1974)	11
2.4.2 Ramos (1995)	12
2.4.3 Menétrey e Brühwiler (1996)	13
2.4.4 El Salakawy, Soudki e Polak (2004)	16

2.4.5 Harajli, Soudki e Kudsi (2006)	21
2.4.6 Duarte (2008)	24
2.5 Regulamentos	30
2.5.1 REBAP	30
2.5.2 CEB – FIP Model Code de 1990	32
2.4.3 ACI 318 – 08 (1)	33
2.4.4 Eurocódigo 2	34
Capítulo 3 – Estudo experimental	37
3.1 Introdução.....	37
3.2 Descrição dos modelos ensaiados	38
3.3 Condições de fronteira e carregamento	40
3.4 Caracterização dos materiais	41
3.5 Instrumentação dos ensaios	45
3.6 Execução dos ensaios	47
3.6.1 Modelo R	47
3.6.2 Modelos reforçados.....	48
3.7 Análise dos resultados	51
3.7.1 Extensões na armadura longitudinal superior	51
3.7.2 Deslocamentos verticais.....	63
3.7.3 Evolução da força nos parafusos de reforço	70
3.7.4 Comportamento na rotura	83
3.7.5 Cargas de rotura experimentais.....	85

3.7.6 Comparação das cargas de rotura experimentais com o previsto em alguns regulamentos	86
3.7.6.1 EC2.....	86
3.7.5.2 ACI 318 – 08	89
3.7.6.3 Resumo.....	91
3.7.6 Inclinação das superfícies de rotura	92
Capítulo 4 Conclusões finais e desenvolvimento futuros	95
4.1 Introdução.....	95
4.2 Efeito do carregamento cíclico na resistência ao punçoamento de modelos reforçados com parafusos verticais pré-esforçados	96
4.2.1 Extensões nas armaduras longitudinais superiores	96
4.2.2 Deslocamentos verticais.....	96
4.2.3 Evolução da força nos parafusos de reforço.....	96
4.2.4 Cargas e modos de rotura ao punçoamento.....	97
4.2.5 Inclinação da superfície de rotura	97
4.3 Desenvolvimentos futuros	98
Referências	99

Índice de figuras

Figura 2.1 – Imagens dos acidentes de Seul e Wolverhampton	5
Figura 2.2 – Transferência de forças e momentos entre o pilar e a laje	6
Figura 2.3 – Esquema de rotura por punçoamento numa laje de betão armado [16]	7
Figura 2.4 – Esquema do mecanismo de resistência ao punçoamento [7]	8
Figura 2.5 – Capitel de betão projectado [18]	10
Figura 2.6 – Capitel metálico [18].....	10
Figura 2.7 – Evolução da flecha com a carga.....	11
Figura 2.8 – Características geométricas dos modelos PR1 e PR2	12
Figura 2.9 – Esquemas do reforço dos modelos PR1e PR2 respectivamente	12
Figura 2.10 – Geometria e condições de fronteira das lajes ortogonais de Menétrey e Brühwiler	14
Figura 2.11 – Modelos dos ensaios	15
Figura 2.12 – Relação carga-deslocamento dos 6 modelos.....	15
Figura 2.13 – Superfície de rotura da laje 1 (não reforçada) e da laje 6 (reforçada).....	16
Figura 2.14 – Geometria e armaduras dos modelos de El Salakawy, Soudki e Polak	17
Figura 2.15 – Pormenorização I e II respectivamente.....	19
Figura 2.16 – Esquema do reforço transversal (medidas em mm)	19
Figura 2.17 – Aspecto final das lajes SX-GF e SX-GF-SB respectivamente	20
Figura 2.18 – Aspecto final da laje SH-GF	20
Figura 2.19 – Relação carga-deformação máxima para lajes sem e com aberturas dos ensaios de El Salakawy, Soudki e Polak	20

Figura 2.20 – Parafusos verticais de reforço	22
Figura 2.21 – Dimensões e características do reforço de Harajli, Soudki e Kudsi	23
Figura 2.22 – Definição geométrica dos modelos.....	25
Figura 2.23 – Esquema do reforço e localização dos extensómetros.....	26
Figura 2.24 – Geometria dos parafusos utilizados	26
Figura 2.25 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga aplicada dos vários modelos	27
Figura 2.26 – Localização em planta dos deflectómetros	28
Figura 2.27 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal	28
Figura 2.28 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (REBAP)30	
Figura 2.29 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (MC90)..	32
Figura 2.30 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (ACI 318–08).....	33
Figura 2.31 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (EC2).....	34
Figura 3.1 – Laboratório de Estruturas da FCT – UNL	37
Figura 3.2 – Armaduras longitudinais dos modelos.....	38
Figura 3.3 – Betonagem dos modelos	38
Figura 3.4 – Definição geométrica dos modelos.....	39
Figura 3.5 – Aspecto geral do ensaio	40
Figura 3.6 – Carregamento efectuado através de um macaco hidráulico	41
Figura 3.7 – Evolução da tensão com a extensão de um varão de Ø 6	42
Figura 3.8 – Evolução da tensão com a extensão de um varão de Ø 10	43
Figura 3.9 – Geometria dos parafusos de reforço utilizados (M6 e M8)	43
Figura 3.10 – Evolução da força de um parafuso M6 com a extensão	44

Figura 3.11 – Evolução da força de um parafuso M8 com a extensão.....	44
Figura 3.12 – Armaduras instrumentadas antes da betonagem	45
Figura 3.13 – Parafusos instrumentados.....	45
Figura 3.14 – Planta das células de carga.....	46
Figura 3.15 – Localização dos deflectómetros em planta	46
Figura 3.16 – Deflectómetros D1 a D5	47
Figura 3.17 – Data logger HBM Spider 8	47
Figura 3.18 – Vista do modelo R após a rotura por punçoamento	48
Figura 3.19 – Esquema de carregamento do modelo C6.....	49
Figura 3.20 – Face superior dos modelos antes da colocação dos parafusos e reparação da face inferior	49
Figura 3.21 – Geometria do reforço dos modelos	50
Figura 3.22 – Geometria das chapas de ancoragem dos parafusos	50
Figura 3.23 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior no modelo R (varões na direcção y).....	52
Figura 3.25 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 1	53
(varões na direcção y).....	53
Figura 3.26 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 1 (eixo x).....	54
Figura 3.27 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 2	55
(varões na direcção y).....	55
Figura 3.28 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 2 (eixo x).....	56

Figura 3.29 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 1	57
(varões na direcção y)	57
Figura 3.30 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 1 (eixo x).....	58
Figura 3.31 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 2 (varões na direcção y).....	59
Figura 3.32 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 2 (eixo x).....	60
Figura 3.33 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C6 e M6 a uma distância de 0.75 m do centro.....	64
Figura 3.34 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C6 e M6 a uma distância de 0.30 m do centro.....	64
Figura 3.35 – Deformada na direcção x para vários patamares de carga (modelos C6 e M6)	65
Figura 3.36 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C8 e M8 a uma distância de 0.75 m do centro.....	66
Figura 3.37 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C8 e M8 a uma distância de 0.30 m do centro.....	66
Figura 3.38 – Deformada na direcção x para vários patamares de carga (modelos C8 e M8)	67
Figura 3.39 – Flecha dos modelos R, C6 e M6	68
Figura 3.40 – Flecha dos modelos R, C8 e M8	68
Figura 3.43 – Evolução da força no parafuso 1 dos modelos C6 e M6	71
Figura 3.44 – Evolução da força no parafuso 2 dos modelos C6.....	72
Figura 3.45 – Evolução da força no parafuso 3 dos modelos C6 e M6	72
Figura 3.46 – Evolução da força no parafuso 4 dos modelos C6 e M6	73

Figura 3.48 – Evolução da força no parafuso 10 dos modelos C6 e M6.....	74
Figura 3.51 – Evolução da força média nos parafusos interiores (2, 4, 10 e 12) dos modelos C6 e M6.....	75
Figura 3.52 – Evolução da força média nos parafusos exteriores (1, 3, 9 e 11) dos modelos C6 e M6	76
Figura 3.53 – Face inferior e superior do modelo C8 após o reforço.....	77
Figura 3.54 – Evolução da força no parafuso 1 dos modelos C8 e M8.....	78
Figura 3.55 – Evolução da força no parafuso 2 dos modelos C8 e M8.....	78
Figura 3.56 – Evolução da força no parafuso 3 dos modelos C8 e M8.....	79
Figura 3.57 – Evolução da força no parafuso 4 dos modelos C8 e M8.....	79
Figura 3.58 – Evolução da força no parafuso 9 dos modelos C8 e M8.....	80
Figura 3.59 – Evolução da força no parafuso 10 dos modelos C8 e M8.....	80
Figura 3.60 – Evolução da força no parafuso 11 dos modelos C8 e M8.....	81
Figura 3.61 – Evolução da força média nos parafusos interiores (2, 4 e 10) dos modelos C8 e M8	81
Figura 3.62 – Evolução da força média nos parafusos exteriores (1, 3, 9 e 11) dos modelos C8 e M8	82
Figura 3.70 – Inclinações da superfície de rotura observadas.....	93
Figura 3.71 – Superfície de rotura do modelo C6 (2 metades)	94
Figura 3.72 – Superfície de rotura do modelo C8 (2 metades)	94

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Resumo dos ensaios de Ramos	13
Quadro 2.2 – Resumo dos ensaios de Menétrey e Brühwiler	14
Quadro 2.3 – Resultados experimentais de Menétrey e Brühwiler.....	15
Quadro 2.4 – Detalhes dos modelos de El Salakawy, Soudki e Polak.....	18
Quadro 2.5 – Resultados experimentais de El Salakawy, Soudki e Polak.....	18
Quadro 2.6 – Resumo dos ensaios de Harajli, Soudki e Kudsi.....	22
Quadro 3.1 – Altura útil média dos modelos	40
Quadro 3.2 – Propriedades mecânicas do betão.....	41
Quadro 3.3 – Propriedades mecânicas do aço da armadura longitudinal	42
Quadro 3.4 – Propriedades do aço de reforço	44
Quadro 3.5 – Carga aplicada na 1ª fase.....	48
Quadro 3.6 – Cargas de rotura	51
Quadro 3.7 – Extensões médias na armadura longitudinal superior em 2 patamares de carga	62
Quadro 3.8 – Deslocamentos em 2 patamares de carga.....	69
Quadro 3.9 – Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M6 e C6 ...	76
Quadro 3.10 – Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M8 e C8 .	82
Quadro 3.11 – Valores experimentais normalizados	86
Quadro 3.12 – Resultados sem a limitação da tensão no aço dos parafusos e sem a limitação do k	88
Quadro 3.13 – Resultados com a limitação da tensão no aço dos parafusos e sem a limitação do k	88

Quadro 3.14 – Resultados com a limitação da tensão no aço dos parafusos e com a limitação do k.....	89
Quadro 3.15 – Resultados obtidos com o ACI 318 – 08	90
Quadro 3.16 – Modos de rotura previstos e experimentais	92
Quadro 3.17 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal.....	93

Capítulo 1

Introdução

1.1 Aspectos gerais

A evolução na concepção arquitectónica dos edifícios está inevitavelmente ligada aos progressos no universo das técnicas construtivas. Um bom exemplo deste facto é a utilização de lajes fungiformes a partir dos anos 1950, como resposta à necessidade de tornar a utilização dos espaços mais versátil, o que se traduz em grandes espaços interiores livres. Apesar de surgir nos anos 1950 em Portugal com a construção do primeiro edifício em laje fungiforme, o “Bloco das águas livres” em Lisboa, é nos anos 1980 que a popularidade desta solução aumenta com a utilização das lajes fungiformes aligeiradas. A partir dos anos 90 assistimos à sua generalização, com a utilização de lajes fungiformes maciças em grande parte das estruturas dos edifícios.

A banalização da utilização de estruturas em laje fungiforme deve-se fundamentalmente à simplicidade, economia e rapidez de execução assim como à flexibilidade de utilização dos espaços.

O comportamento estrutural das lajes fungiformes é bastante complexo, especialmente na zona de ligação pilar-laje, devido à concentração de esforços devidos à flexão e ao corte. Em geral um dos factores determinantes na escolha da espessura da laje a considerar é a sua resistência ao punçoamento.

Resultante da generalização da utilização desta solução estrutural, ocorrem frequentemente problemas relacionados com o punçoamento. Estes problemas podem estar associados a: erros de projecto, erros de execução, aumento da carga actuante na estrutura durante a sua vida útil, deterioração dos materiais e possíveis modificações nos regulamentos. Na concepção da estrutura os principais erros de projecto são a sobrevalorização da rigidez

viga-pilar, utilização de espessuras reduzidas para os vãos e verificação deficiente da segurança aos estados limites últimos de resistência ao punçoamento. Quanto aos erros de execução, algumas vezes associados à redução do custo da obra, temos a redução da espessura da laje, a utilização de betões de classe de resistência inferior à definida no Projecto e no Caderno de Encargos e a não colocação das armaduras de punçoamento.

Então para corrigir possíveis deficiências resultantes das causas acima mencionadas podem ser levadas a cabo operações de reforço que visam aumentar a resistência e ductilidade dos elementos estruturais, melhorando o seu desempenho. A escolha do método de reforço depende de vários factores técnicos e económicos, em especial, da eficácia da operação e das condições e custos da realização da obra.

As técnicas de reforço podem ir desde a substituição de materiais de qualidade inferior por materiais mais resistentes e eficazes, passando pelo aumento das dimensões das secções, pela substituição total ou parcial de elementos ou pela introdução de novos elementos estruturais.

1.2 Objectivos

A motivação para este trabalho surgiu da necessidade de continuar o trabalho experimental desenvolvido nos últimos anos, nomeadamente no caso Português, pelos investigadores Ramos [18, 19, 20, 21] e Duarte [2, 3]. Estes autores estudaram o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos quando submetidas a acções monotónicas.

Neste trabalho pretende-se verificar as alterações provocadas na resistência e modo de rotura das lajes quando solicitadas por um carregamento cíclico e comparar estes resultados experimentais com alguns regulamentos.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação é composta por quatro capítulos. Neste capítulo faz-se uma pequena apresentação ao tema e definem-se os objectivos.

No segundo capítulo introduz-se o estado actual do problema. Faz uma descrição do mecanismo de rotura por punçoamento, um panorama muito geral sobre as técnicas de reforço ao punçoamento de lajes fungiformes, uma breve descrição e análise dos ensaios experimentais relacionados com o tema efectuados até a data e, por fim, são expostos os regulamentos mais relevantes que retratam o tema do punçoamento.

No capítulo 3 surgem os ensaios experimentais. É apresentado todo o procedimento dos ensaios, os materiais e dispositivos envolvidos. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Este capítulo tem como objectivo o estudo do efeito do carregamento cíclico nas lajes fungiformes reforçadas ao punçoamento com parafusos verticais. É feita uma análise dos resultados obtidos dos ensaios experimentais.

O quarto capítulo apresenta as principais conclusões a que se chegou no decorrer deste trabalho e apresentam-se desenvolvimentos futuros para o tema.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Introdução

Nos últimos anos aconteceram alguns acidentes que alertaram os especialistas para o problema da segurança ao punçoamento em edifícios já existentes. Em 1995 em Seul (Coreia do Sul) a laje do quinto piso do Sampoong Department Store entrou em rotura levando ao colapso de todo o edifício [8]. Deste acidente resultaram cerca de 500 mortos. Na localidade de Wolverhampton (Inglaterra) no ano de 1997 o Pipers Row Car Park [23] teve um colapso parcial devido à corrosão das armaduras e à falta de manutenção da estrutura.



Figura 2.1 – Imagens dos acidentes de Seul e Wolverhampton

Com o objectivo de diminuir a probabilidade de ocorrência destes acidentes têm sido desenvolvidas algumas técnicas de reforço ao punçoamento em lajes fungiformes que serão descritas de um modo geral neste capítulo.

Irá igualmente fazer-se uma breve descrição dos ensaios experimentais já realizados para estudar o fenómeno de punção em lajes reforçadas com pré-esforço transversal e serão mencionadas as recomendações presentes em alguns regulamentos que tratam o problema.

2.2 Mecanismo de rotura ao punção

O tipo de rotura por punção é característico de elementos sujeitos a elevadas cargas numa pequena área. É o caso das lajes fungiformes que devido à reacção do pilar às cargas aplicadas na laje, leva à existência de elevadas tensões junto àquele, resultantes da transferência de momentos e forças entre o pilar e a laje, devido às quais se inicia o processo de fendilhação que pode conduzir à rotura da laje por punção.

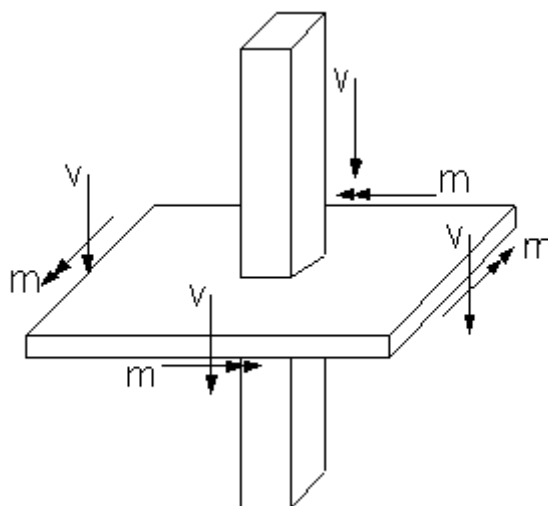


Figura 2.2 – Transferência de forças e momentos entre o pilar e a laje

A rotura por punção é caracterizada pela formação de um tronco de pirâmide que tem tendência para se desligar do resto da laje. Esta rotura localizada pode dar início a uma rotura gradual e a um colapso total da estrutura, já que, a perda de um ponto de apoio vai aumentar os esforços de punção nos apoios vizinhos devido ao incremento de carga. Este mecanismo de colapso local está associado a uma rotura repentina, sem qualquer ductilidade, ou seja, uma rotura frágil, essencialmente condicionada pela resistência à tracção e compressão do betão.

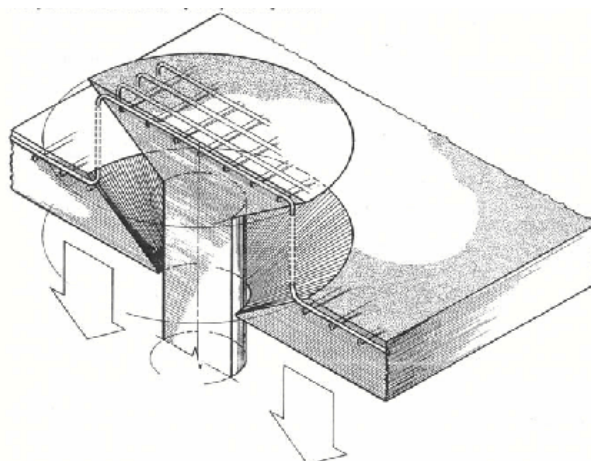


Figura 2.3 – Esquema de rotura por punçoamento numa laje de betão armado [16]

Nesta rotura o fenómeno de maior relevo é a fendilhação, e é utilizado para separar as diferentes fases do processo de rotura por punçoamento de uma laje fungiforme em betão armado. Por ordem cronológica, as fases são as seguintes:

Fase elástica-linear

- Aço e betão com comportamento elástico-linear;
- Não existe fendilhação nem cedência das armaduras;
- No fim desta fase surge a primeira fenda tangencial para a carga crítica de fendilhação.

Fase de resposta à flexão

- Aparecimento da primeira fenda à flexão, tangencial ao pilar, localizada na face superior da laje e contornando o perímetro do pilar;
- Surgem fendas radiais junto ao perímetro do pilar que se propagam até ao limite da laje com o incremento da carga vertical.

Fase de resistência ao corte

- Surgem as fendas inclinadas ao longo da espessura da laje;
- Aparecimento de um grande numero de fendas de flexão;
- As fendas abrem e juntam-se numa só fenda inclinada que origina a rotura por punçoamento.

Fase de pós-rotura ao punçoamento

- A fenda inclinada divide duas partes distintas da laje. As duas partes ficam ligadas entre si pela armadura existente que atravessa a fenda.

No mecanismo de resistência ao punçoamento, as forças que equilibram a força de punçoamento são as componentes verticais da força de compressão radial (1), da força de atrito entre os inertes na fenda (2) e da força do efeito de ferrolho (3).

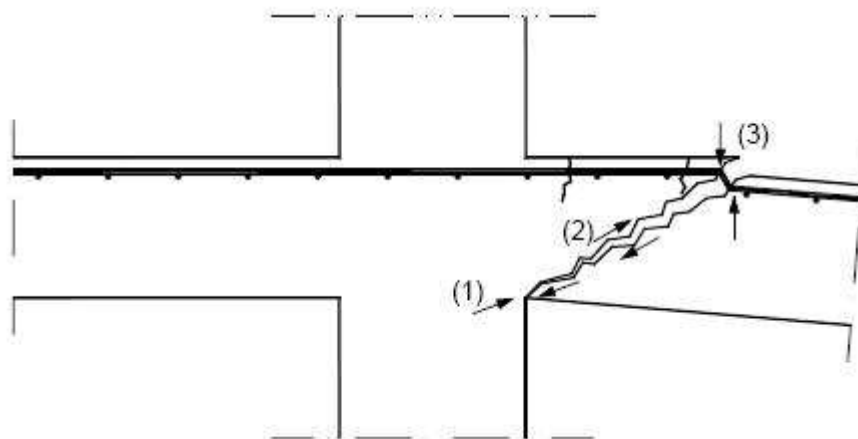


Figura 2.4 – Esquema do mecanismo de resistência ao punçoamento [7]

A resistência ao punçoamento de uma laje fungiforme depende especialmente da geometria da área carregada, da espessura da laje, da resistência do betão e da quantidade de armadura de flexão e de punçoamento.

2.3 Técnicas de reforço de lajes fungiformes ao punçoamento

Apesar de este trabalho incidir no reforço de lajes fungiformes com pré-esforço transversal, faz-se aqui uma breve apresentação de algumas soluções possíveis de reforço de lajes ao punçoamento possíveis.

2.3.1 Armaduras transversais

Neste sistema utiliza-se parafusos (geralmente pré-esforçados) que atravessam a laje em toda a sua espessura, sendo ancorados junto às faces da laje. Caso não seja possível o acesso à face superior utiliza-se varões que não atravessam toda a laje, e que são convenientemente amarrados através da injeção dos furos.

Este sistema aumenta substancialmente a resistência ao punçoamento e conduz a uma maior ductilidade da ligação laje-pilar.

Alguns estudos experimentais com este sistema serão apresentados com maior destaque no ponto seguinte.

2.3.2 Espessamento da laje

Aplicação de uma camada complementar de betão. Esta camada aumenta a resistência ao punçoamento e simultaneamente a resistência à flexão da laje. Para ser utilizada como reforço da resistência ao corte devem ser tomadas medidas especiais na zona da junta das duas camadas (utilização de conectores, por exemplo) para que esta possa transmitir todas as forças presentes na zona do possível cone de punçoamento e portanto garantir o comportamento monolítico do elemento construtivo. No entanto, esta camada aumenta o peso próprio da estrutura aumentando igualmente a carga de punçoamento.

Para esta técnica ser eficaz é necessário uma boa escolha dos materiais de reparação, uma preparação cuidada da superfície do betão velho e das armaduras e uma eficaz aplicação e cura do betão de reparação.

2.3.3 Maior secção do pilar

O perímetro da área de carregamento aumenta, com o incremento da secção do pilar, e consequentemente a resistência ao punçoamento da laje é igualmente incrementada.

2.3.4 Adição de capitel de betão

Este método consiste na colocação de um capitel de betão armado por baixo da laje fungiforme, junto ao pilar, de modo a aumentar a altura útil na zona de punçoamento, aumentando assim a resistência da laje ao punçoamento.

O capitel pode ter a forma prismática, tronco-cónica ou em tronco de pirâmide invertida de secção rectangular (figura 2.5)

Este capitel pode ser construído usando a técnica de betonagem convencional ou utilizando a técnica do betão projectado. Deve existir uma especial preocupação com a superfície de contacto entre o betão velho e o betão novo, e com o tipo de betão de reforço a utilizar.

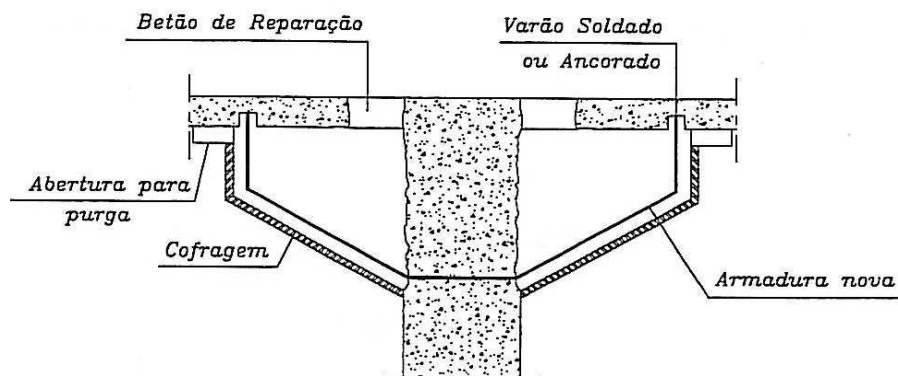


Figura 2.5 – Capitel de betão projectado [18]

2.3.5 Adição de capitel metálico

Aplicação de um capitel formado por perfis metálicos. O capitel deve ser fixado por colagem com resina epoxi e buchas metálicas de expansão mecânica. O espaço entre a face inferior da laje e o capitel metálico é preenchido, para que este seja solicitado logo desde o início do carregamento.



Figura 2.6 – Capitel metálico [18]

2.3.6 Utilização de FRP

A aplicação de compósitos de FRP, no reforço de estruturas de betão armado, é relativamente recente, mas a sua utilização tem vindo a revelar-se altamente promissora. O uso destes materiais, na zona crítica de momento negativo junto ao pilar, pode atrasar o processo de fendilhação que culmina com a formação do cone de punçoamento, aumentar a resistência à flexão e indirectamente melhorar a resistência ao corte desta zona. Geralmente, são aplicados nas duas direcções ortogonais em laminados de CFRP (fibras de carbono) ou de GFRP (fibras de vidro) colados exteriormente.

2.4 Ensaios experimentais

Serão apresentados nos pontos seguintes alguns dos ensaios experimentais levados a cabo por diversos investigadores para estudar o comportamento ao punçoamento de lajes fungiformes reforçadas com parafusos verticais.

2.4.1 Ghali (1974)

Ensaio conduzido por Ghali [9] mostram que pré-esforçando verticalmente a laje perto da face do pilar pode-se evitar, ou retardar, a rotação e o alargamento da fenda inclinada necessária para formar a superfície de rotura, podendo conduzir a um substancial incremento na resistência das lajes ao punçoamento. Nestes ensaios obtiveram-se incrementos de cargas últimas de 67% a 92%, quando comparadas com lajes similares sem reforço.

Nos ensaios realizados por Ghali a superfície de rotura intersectou a face em compressão junto ao pilar nas lajes sem pré-esforço transversal nem armadura específica de punçoamento. Nas lajes com pré-esforço transversal a superfície de rotura intersectou a face em compressão fora das placas de ancoragem dos parafusos.

Conclui igualmente, que lajes com pré-esforço transversal podem suportar maiores deformações antes da rotura, tornando-se mais dúcteis. Esta característica é particularmente importante para estruturas sujeitas a sismos.

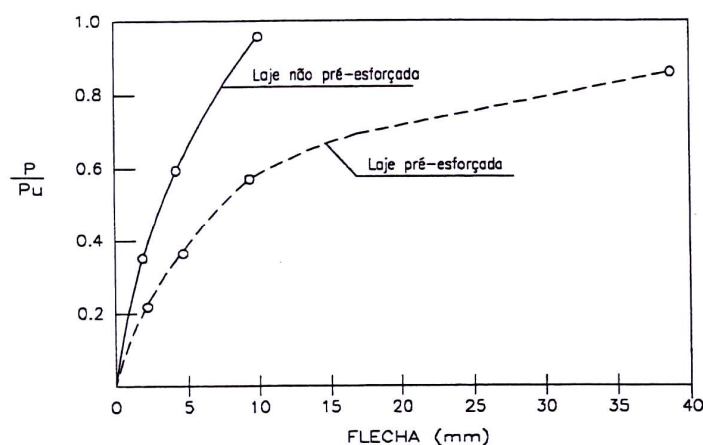


Figura 2.7 – Evolução da flecha com a carga

2.4.2 Ramos (1995)

Ramos [18, 19, 20, 21] ensaiou dois modelos de lajes fungiformes maciças e quadradas com 2.00m de lado e 0.10m de espessura, reforçadas ao punçoamento com 8 parafusos pré-esforçados dispostos numa camada em torno do pilar. As lajes foram previamente carregadas com cerca de 70% da carga de rotura prevista sem reforço (146 kN). Posteriormente foram descarregados, tendo sido executados os furos verticais para colocação dos parafusos. Estes foram pré-esforçados com uma força de 5.0 kN no modelo PR1 e 15.0 kN no modelo PR2, e ancorados com placas de aço nas superfícies superior e inferior da laje.

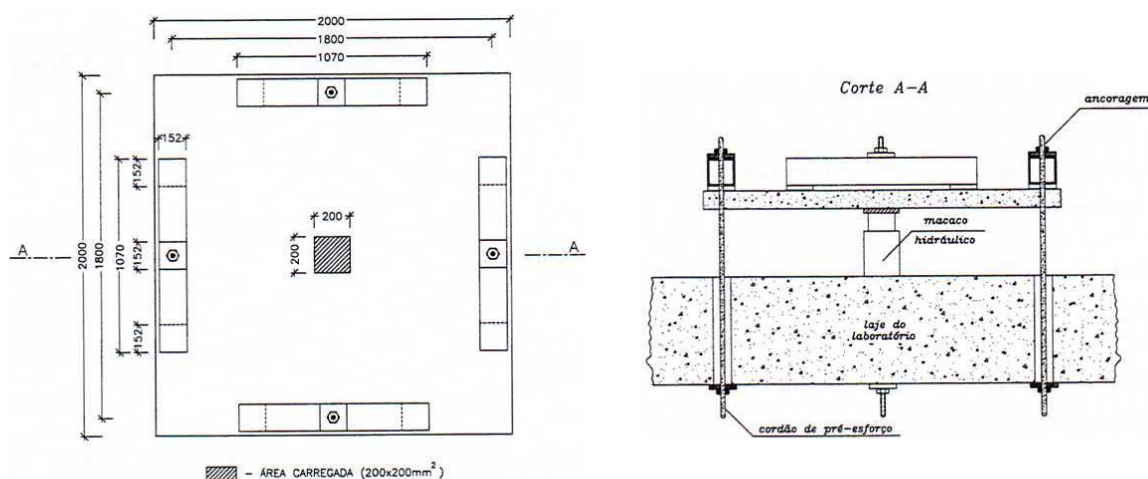


Figura 2.8 – Características geométricas dos modelos PR1 e PR2

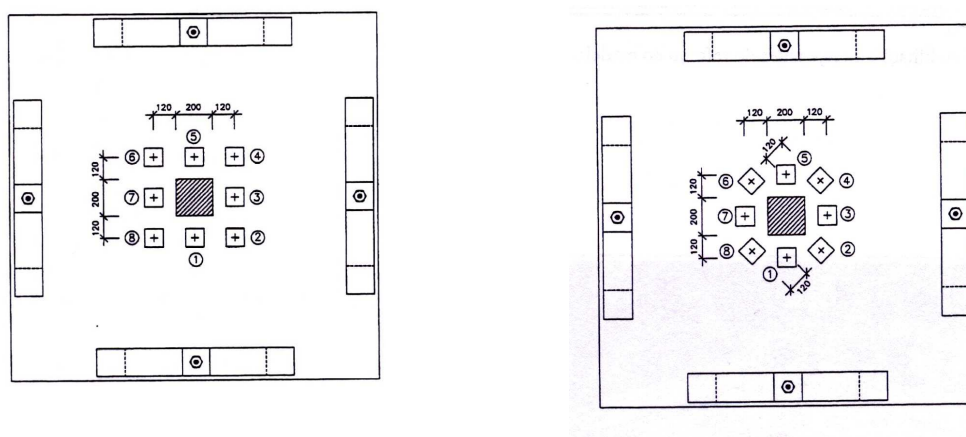


Figura 2.9 – Esquemas do reforço dos modelos PR1e PR2 respectivamente

A análise dos resultados revelou que a distribuição de forças nos parafusos é mais uniforme no modelo PR2 do que no modelo PR1, e no modelo PR2, nenhum dos parafusos

entrou em cedência, ao contrário do modelo PR1, em que os parafusos 1,3 e 7 cederam na rotura. Verificou-se nos dois modelos, um acréscimo acentuado de força nos parafusos, quando a carga aplicada é próxima da resistência última ao punçoamento das lajes sem reforço.

Em relação ao comportamento na rotura, no modelo PR1, a superfície de rotura passou entre os parafusos e o pilar (3 parafusos em cedência) e a inclinação da superfície em relação ao plano da laje foi de 40°. Em relação ao modelo PR2, a superfície de rotura passou a intersectar a face em compressão da laje para além das placas de ancoragem e a inclinação da superfície em relação ao plano da laje foi de 28°.

No quadro seguinte apresenta-se uma síntese dos resultados experimentais. Nele são apresentados os valores obtidos para a resistência à compressão em provetes cúbicos (f_{ccm}), a tensão de rotura à tracção da armadura longitudinal superior (f_{su}), da força de rotura à tracção dos parafusos utilizados no reforço (F_u) e os valores da carga de rotura experimental dos modelos ensaiados (V_{exp}).

Quadro 2.1 – Resumo dos ensaios de Ramos

Modelo	Betão	Varões	Parafusos	V_{exp} (kN)
	f_{ccm} (MPa)	f_{su} (MPa)	F_u (kN)	
PR1	39.2	575	36.1	240
PR2	38.6			250

Concluiu, que o reforço com recurso a parafusos pré-esforçados fornece um incremento substancial da resistência ao punçoamento de lajes fungiformes. Foi obtido nestes ensaios um aumento de 21% para o modelo PR1 e um aumento de 25% para o modelo PR2, em relação à resistência prevista sem reforço.

2.4.3 Menétrey e Brühwiler (1996)

Menétrey e Brühwiler [16, 17] estudaram 6 modelos de laje fungiforme. Os modelos eram octogonais com diâmetro de 1.20 m e com uma espessura de 0.12 m. A geometria dos mesmos pode ser vista na figura seguinte.

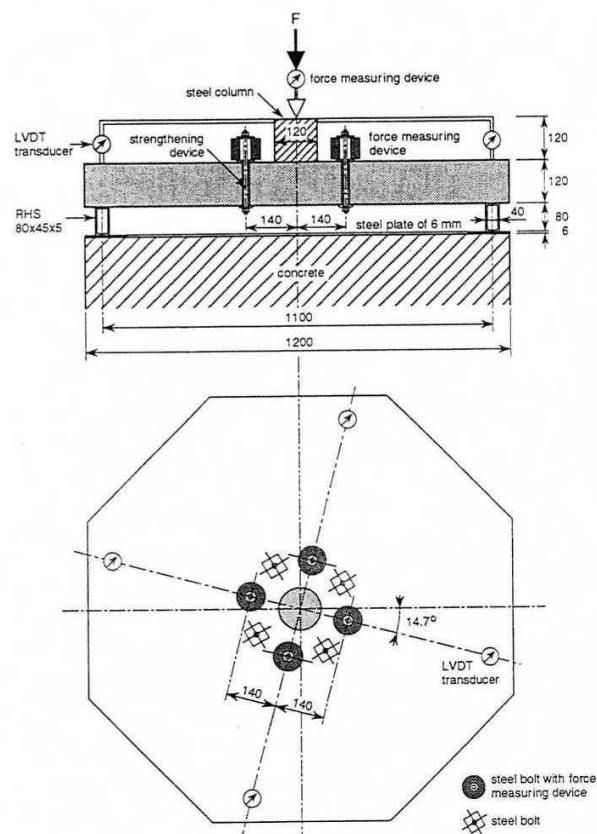


Figura 2.10 – Geometria e condições de fronteira das lajes octogonais de Menétrey e Brühwiler

No quadro 2.2 apresenta-se um resumo dos ensaios efectuados, a laje número 1 é a laje de referência e não continha armadura de reforço.

Quadro 2.2 – Resumo dos ensaios de Menétrey e Brühwiler

Laje	Parafusos	Força instalada nos parafusos	Tipo de injeção
1	Sem parafusos	-	-
2	8 Ø 10 mm	Ajustada	Não injectados
3	8 Ø 10 mm	$P_0 = 35.3 \text{ kN}$	Não injectados
4	8 Ø 10 mm	Ajustada	Resina epoxi
5	8 Ø 10 mm	$P_0 = 15.6 \text{ kN}$	Resina epoxi
6	8 Ø 10 mm	$P_0 = 35.4 \text{ kN}$	Resina epoxi

No quadro 2.2 apresenta-se um resumo dos resultados experimentais obtidos. Da laje 1 para a laje 6 foi obtido um incremento de resistência ao punçoamento de cerca de 37%. Relativamente ao deslocamento vertical, correspondente à carga máxima, este aumenta significativamente para as lajes reforçadas, aumentando o comportamento dúctil da laje.

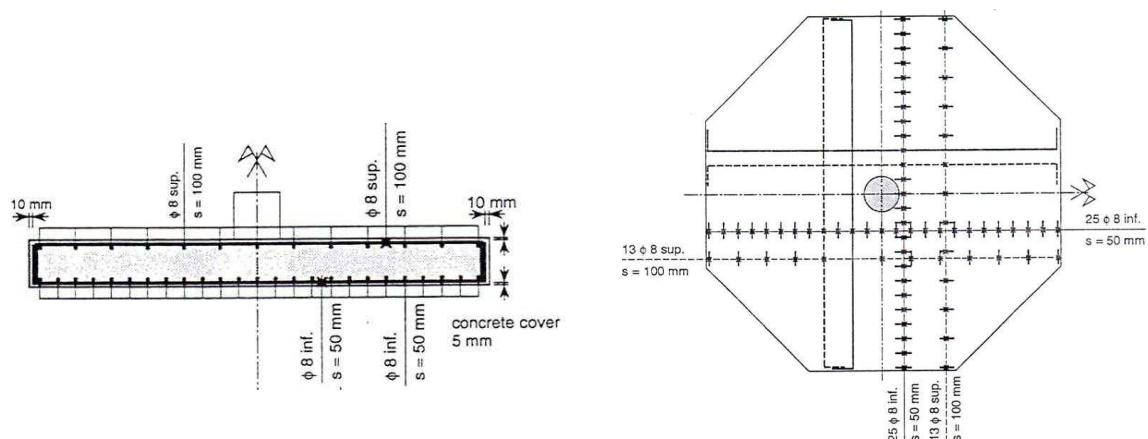


Figura 2.11 – Modelos dos ensaios

Quadro 2.3 – Resultados experimentais de Menétrey e Brühwiler

Laje	V_{exp} (kN)	w (V_{exp}) (mm)	F_b (max) (kN)	w (F_b (max)) (mm)
1	280.1	4.2	-	-
2	359.4	9.89	34.39	11.95
3	375.2	9.56	37.25	12.15
4	367.6	10.06	14.42	11.59
5	361.1	9.7	20.64	11.78
6	383.0	9.06	37.04	11.09

Nota:

V_{exp} – carga de rotura experimental; w (V_{exp}) – deslocamento vertical correspondente à carga de rotura; F_b (max) – força máxima nos parafusos; w (F_b (max)) – deformação da laje correspondente à força máxima nos parafusos.

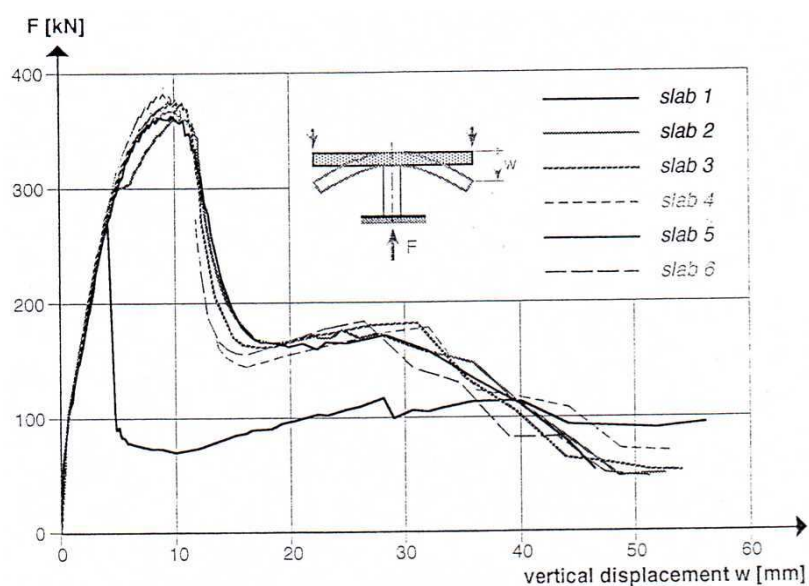


Figura 2.12 – Relação carga-deslocamento dos 6 modelos

A inclinação da superfície de rotura da laje 1 com a horizontal, variou de 30° a 35°, e para as restantes lajes reforçadas, foi obtido um cone de punçoamento com uma maior inclinação com a horizontal, tendo-se formado entre o pilar e o perímetro definido pelos parafusos, ou seja, as superfícies de rotura das lajes reforçadas passaram interiormente ao perímetro dos parafusos (Fig. 2.13).

O incremento da força de pré-esforço aplicada aos parafusos, para as lajes com furos não injectados, originou um ligeiro aumento da resistência ao punçoamento, cerca de 4%.

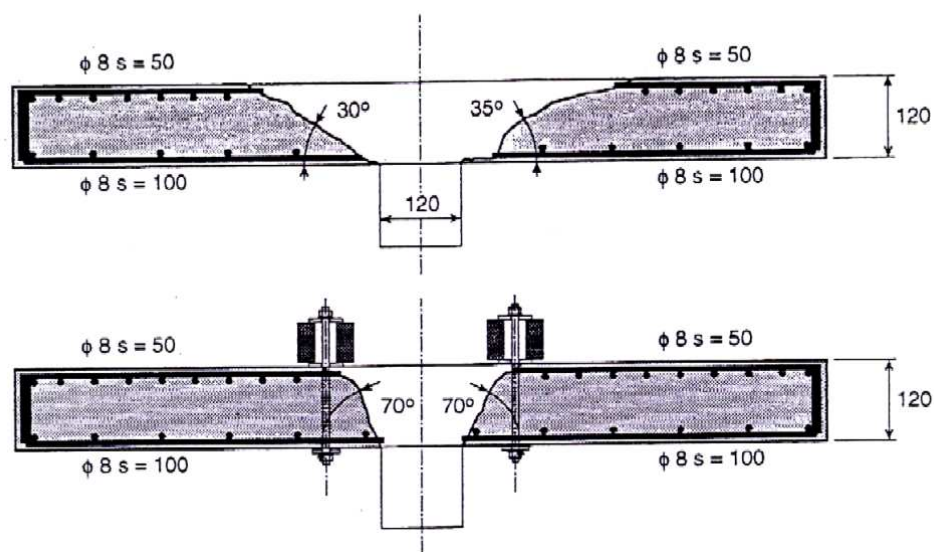
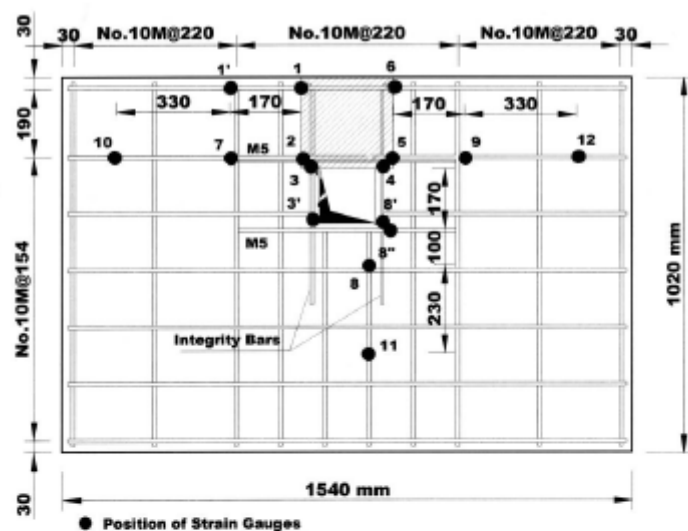


Figura 2.13 – Superfície de rotura da laje 1 (não reforçada) e da laje 6 (reforçada)

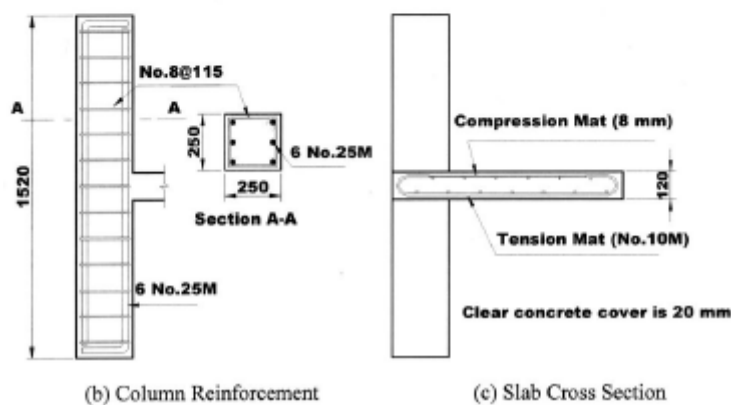
Relativamente ao efeito da injeção dos furos conclui que esta quase não tem efeito na capacidade resistente da laje ao punçoamento, já que foi obtido um incremento de apenas 2% em relação às lajes não injectadas. No entanto, verificou que a formação da superfície de rotura é retardada pelos parafusos injectados. A força máxima instalada nos parafusos, no caso dos furos injectados, é inferior à máxima, no caso dos não injectados. No entanto obteve-se um melhor comportamento em serviço destas lajes. De salientar ainda que, a injeção dos furos protege os parafusos contra a corrosão.

2.4.4 El Salakawy, Soudki e Polak (2004)

El Salakawy, Soudki e Polak [4] estudaram sete modelos à escala reduzida de laje fungiforme reforçados ao punçoamento na zona do pilar com diferentes métodos. As dimensões dos modelos em planta eram de 1,54x1,02 m² com 0.12 m de espessura e em três destas lajes existia uma abertura (0.15x0.15 m) na vizinhança do pilar.



(a) Tension Flexural Reinforcement



(b) Column Reinforcement

(c) Slab Cross Section

Figura 2.14 – Geometria e armaduras dos modelos de El Salakawy, Soudki e Polak

Os modelos ensaiados foram divididos em 3 séries:

- Série 1: corresponde à série de referência;
- Série 2: constituída por 3 modelos sem abertura, dois dos quais reforçados com fibras de carbono e de vidro de acordo com a pormenorização I e um terceiro modelo reforçado com a solução conjunta de fibras de vidro e parafusos aço verticais;
- Série 3: constituída por dois modelos com abertura, um reforçado com fibras de vidro, de acordo com a pormenorização II, e outro reforçado com a solução conjunta de fibras de vidro com parafusos de aço verticais.

Quadro 2.4 – Detalhes dos modelos de El Salakawy, Soudki e Polak

Série	Laje	% de armadura e de reforço				Observações
		Perpendicular ao bordo livre		Paralela ao bordo livre		
		ρ _s	ρ _f	ρ _s	ρ _f	
1	XXX	0.75	N/A	0.45	N/A	Referência sem abertura
	SF0	0.75	N/A	0.45	N/A	Referência com abertura
2	SX-GF	0.75	0.34	0.45	0.24	1 camada
	SX-CF	0.75	0.05	0.45	0.05	1 camada
	SX-GF-SB	0.75	0.34	0.45	0.24	1 camada + parafusos
3	SH-GF	0.75	0.52	0.45	0.38	2 camadas
	SH-GF-SB	0.75	0.52	0.45	0.38	2 camadas + parafusos

Nota: N/A = não aplicável; $\rho_f = (A_f/bh)$; SX – sem buraco; SH – com buraco; GF – fibras de vidro; CF – fibras de carbono; SB – parafusos de aço verticais.

No caso das lajes sem abertura junto ao pilar as fibras foram coladas apenas na face traccionada (em L), enquanto nas lajes com aberturas as fibras foram coladas em ambas as faces (em U).

Nos modelos reforçados com a solução conjunta, os parafusos responsáveis pelo reforço transversal foram dispostos em torno do pilar em fileiras a uma distância $d/2$, d e $1.5d$ da face do pilar ($d = 90$ mm). A força de pré-esforço inicial aplicada aos parafusos foi cerca de 40% da força de cedência dos parafusos, sendo esta força de pré-esforço transmitida à laje através de placas de aço circulares de 48 mm de diâmetro e 9.5 mm de espessura.

Quadro 2.5 – Resultados experimentais de El Salakawy, Soudki e Polak

Série	Laje	V_{exp} (kN)	Mecanismo de rotura
1	XXX	125	Punçoamento
	SF0	110	Punçoamento
2	SX-GF	130	Punçoamento
	SX-CF	126	Punçoamento
	SX-GF-SB	170	Flexão
3	SH-GF	135	Punçoamento
	SH-GF-SB	162	Flexão

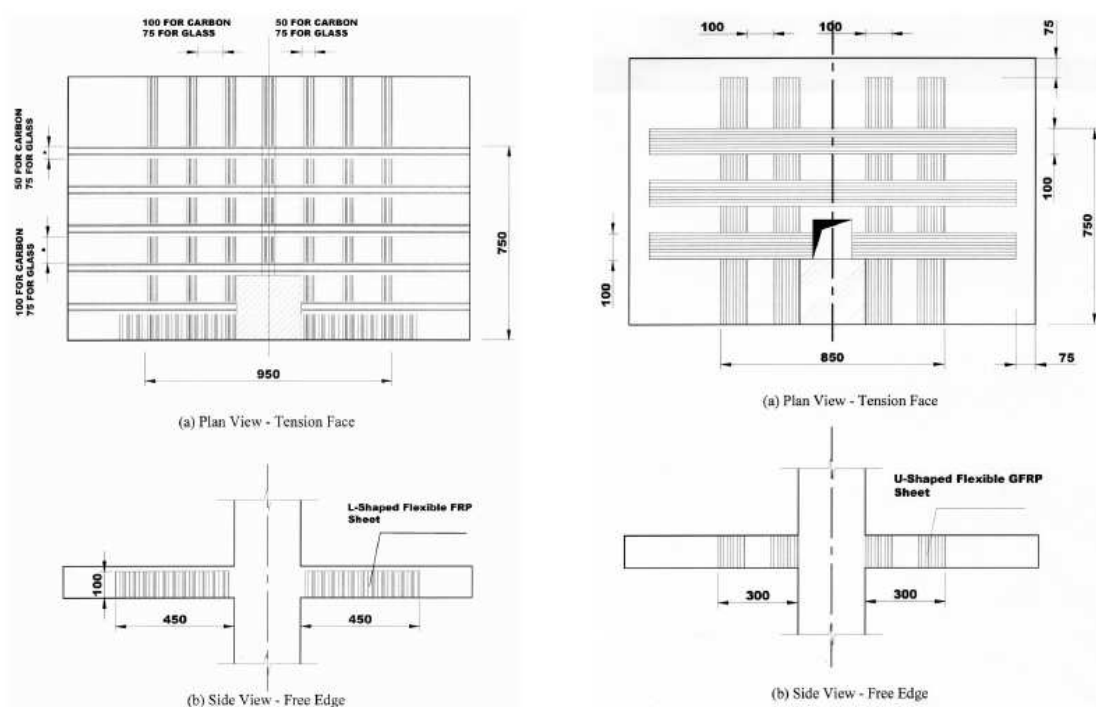


Figura 2.15 – Pormenorização I e II respectivamente

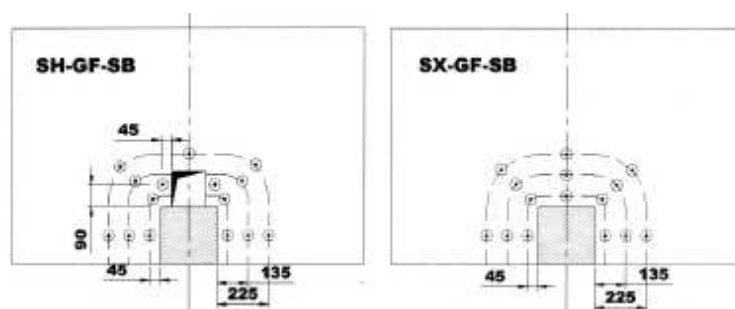


Figura 2.16 – Esquema do reforço transversal (medidas em mm)

Com base nestes estudos experimentais pode-se concluir que a presença de FRP (Fiber Reinforced Polymers) aumenta a resistência à flexão das lajes, retarda o aparecimento da primeira fenda de flexão e por consequência aumenta a resistência ao punção. Dependendo da área e da disposição do reforço de FRP, o aumento da resistência ao punção variou entre os 2 e os 23 %.

Todas as lajes reforçadas apenas com FRP tiveram uma rotura por punção, ao contrário das reforçadas com a solução conjunta que tiveram uma rotura por flexão. As superfícies de rotura das lajes reforçadas com FRP, em média, passaram a uma distância à face do pilar semelhante à das lajes de referência.

Os parafusos verticais aumentam a ductilidade da laje na zona do pilar e alteram o modo de rotura de punção para flexão. A utilização da solução conjunta conduziu a um aumento da carga última entre os 23 e os 30%.

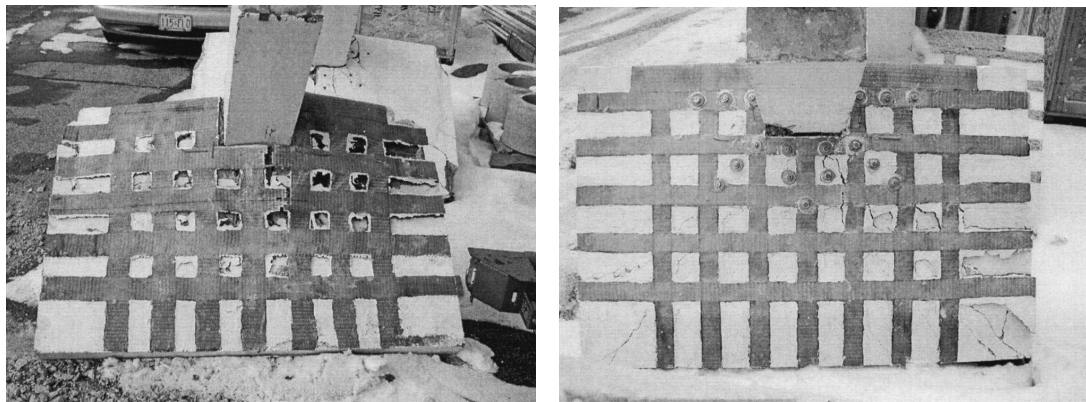


Figura 2.17 – Aspecto final das lajes SX-GF e SX-GF-SB respectivamente

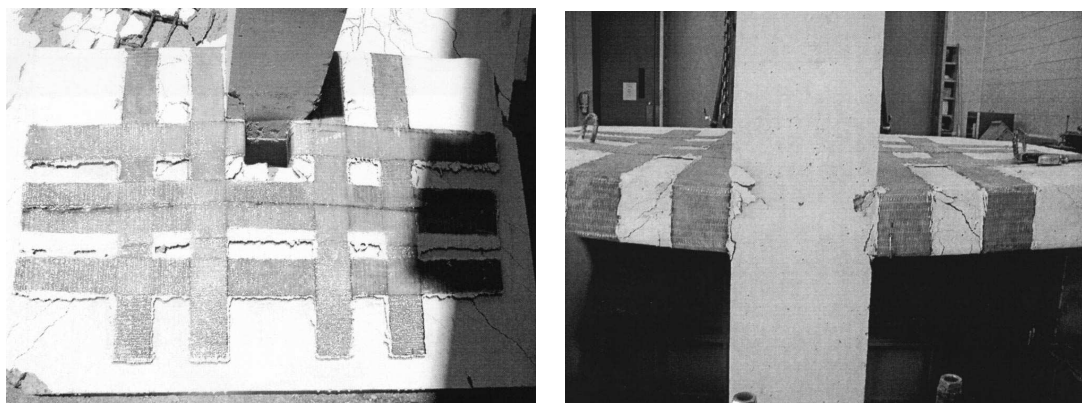


Figura 2.18 – Aspecto final da laje SH-GF

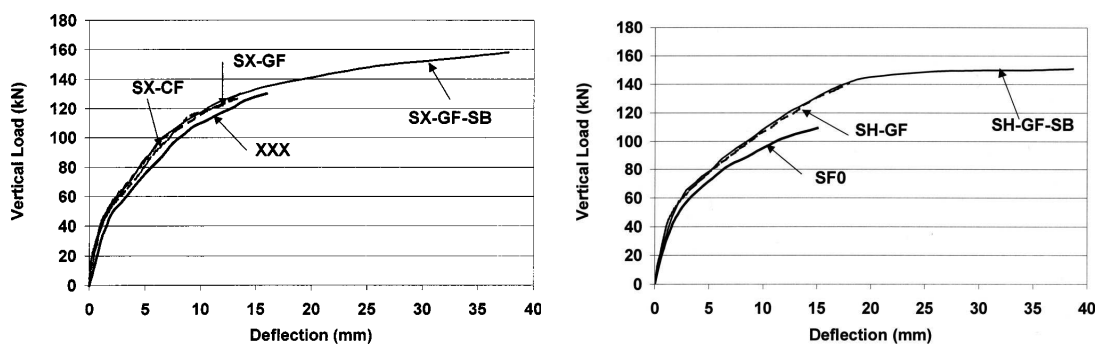


Figura 2.19 – Relação carga-deformação máxima para lajes sem e com aberturas dos ensaios de El Salakawy, Soudki e Polak

2.4.5 Harajli, Soudki e Kudsi (2006)

Harajli, Soudki e Kudsi [10] ensaiaram 18 modelos de laje reforçados com laminados de CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) e parafusos verticais. A técnica consiste na utilização combinada de parafusos verticais introduzidos em orifícios e pré-esforçados contra a superfície de betão para melhorar a resistência ao punçoamento, e reforço exterior de FRP junto à face em tracção da laje nas duas direcções perpendiculares para aumentar a resistência à flexão.

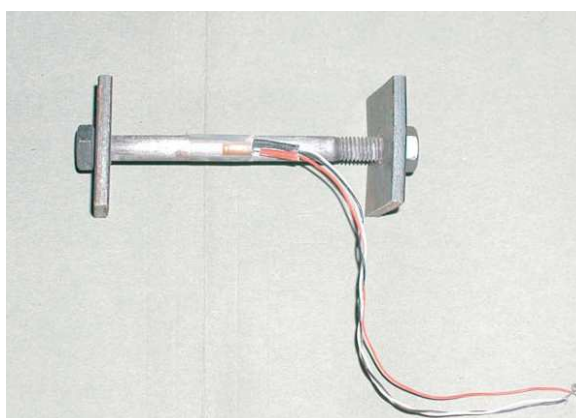
Foram ensaiados modelos de laje quadrada com dimensões em planta de $0.67 \times 0.67 \text{ m}^2$, apoiados num pilar central de dimensões $0.10 \times 0.10 \text{ m}^2$ em que as variáveis foram a espessura da laje, a percentagem de armadura longitudinal, a espessura de CFRP e configuração e diâmetro dos parafusos verticais. As lajes foram ensaiadas com os bordos simplesmente apoiados e os cantos não estavam impedidos de levantar durante a aplicação da carga.

Os laminados de CFRP foram colados à face em tracção da laje, com resinas epoxy, nas duas direcções ortogonais. No reforço vertical utilizaram-se parafusos de 8 mm pré-esforçados dispostos de duas formas diferentes, nas séries A1, A2, B1 e B2 foram disposto em duas camadas de 4 parafusos, enquanto nas séries A2-I, B1-I e B2-I foram dispostos apenas numa camada de 8 parafusos. Para transmitir a força de pré-esforço à laje foram utilizadas placas de aço com $40 \times 40 \text{ mm}^2$ e 5 mm de espessura coladas em ambas as faces das lajes.

Quadro 2.6 – Resumo dos ensaios de Harajli, Soudki e Kudsi

Série	Designação	Espesura da laje (mm)	Armadura longitudinal	Espesura de CFRP (mm)	Num. parafusos aço Ø8	f_{cm} (MPa)
A1	SA1(referência)	55	5Ø8	0	0	26.1
	SA1-B	55	5Ø8	0	8	28.1
	SA1-BF	55	5Ø8	100	8	26.1
A2	SA2(referência)	55	7Ø8	0	0	25.4
	SA2-B	55	7Ø8	0	8	25.4
	SA2-BF	55	7Ø8	150	8	32.4
B1	SB1(referência)	75	5Ø10	0	0	28.1
	SB1-B	75	5Ø10	0	8	28.1
	SB1-BF	75	5Ø10	150	8	26.1
B2	SB2(referência)	75	7Ø10	0	0	32.4
	SB2-B	75	7Ø10	0	8	25.4
	SB2-BF	75	7Ø10	150	8	32.4
A2-I	SA2-BI	55	7Ø8	0	8	30.5
	SA2-BFI	55	7Ø8	150	8	31.3
B1-I	SB1-BI	75	5Ø10	0	8	30.5
	SB1-BFI	75	5Ø10	150	8	30.5
B2-I	SB2-BI	75	7Ø10	0	8	31.3
	SB2-BFI	75	7Ø10	150	8	31.3
A1 ^a	A1(referência) ^a	55	5Ø8	0	0	31.9
	SA1-F ^a	55	5Ø8	100	0	34.3
A2 ^a	A2(referência) ^a	55	7Ø8	0	0	31.5
	SA2-F ^a	55	7Ø8	150	0	35.5
B1 ^a	B1(referência) ^a	75	5Ø10	0	0	35.5
	SB1-F ^a	75	5Ø10	150	0	33.0
B2 ^a	B2(referência) ^a	75	7Ø10	0	0	29.1
	SB2-F ^a	75	7Ø10	150	0	29.1

Nota: f_{cm} – resistência média à compressão do betão em provetes cilíndricos

**Figura 2.20** – Parafusos verticais de reforço

Relativamente à relação carga-deformação, verificou-se em todos os modelos uma primeira fase linear em regime elástico até ao início da fendilhação, seguida de uma ligeira redução da rigidez antes da rotura dos modelos.

Os autores verificaram que a utilização de parafusos no reforço de lajes fungiformes aumenta cerca de 6 a 24% a capacidade resistente das mesmas, dependendo do tipo de laje e da configuração dos parafusos. Nos modelos em que a rotura se deu por flexão ou pela conjugação punçoamento-flexão a rotura foi precedida por uma fase inelástica devido à cedência da armadura ordinária das lajes. Concluíram que a utilização de parafusos verticais no reforço de lajes fungiformes aumentou a ductilidade da laje.

As lajes reforçadas apenas com CFRP tiveram um aumento de resistência entre os 16 e os 32 % em relação às lajes de referência, sendo este aumento justificado pela capacidade das fibras de carbono de limitarem a abertura de fendas.

As lajes reforçadas com a solução conjunta, parafusos verticais e CFRP, obtiveram um aumento da carga resistente entre 26 e 77%, e este foi o maior aumento em relação aos outros tipos de reforço (apenas CFRP e apenas parafusos verticais).

2.4.6 Duarte (2008)

Duarte [2, 3] ensaiou cinco modelos de laje fungiforme com dimensões em planta de 1.80x1.80 m² e espessura de 0.12 m, sendo uma das lajes a de referência (ID1), e as restantes quatro (ID2 a ID5) reforçadas com dezasseis parafusos transversais, obtidos de varões roscados, dispostos em duas camadas de oito em torno do pilar. As variáveis deste trabalho experimental foram a área transversal de armadura de reforço e o pré-esforço inicial aplicado aos parafusos.

Nos modelos, a armadura superior é constituída por uma malha quadrada de Ø10//0.075 e a inferior por uma malha quadrada de Ø6//0.20, sendo a armadura superior com maior altura útil orientada na direcção N-S. Na face superior foi utilizado um recobrimento de 20 mm enquanto na face inferior foi utilizado um recobrimento de 10 mm.

Os modelos ID2 a ID5, numa primeira fase, foram carregadas, por intermédio de um macaco hidráulico, até se atingir uma força correspondente a cerca de 60 % da carga de rotura do modelo ID1. Após ter sido atingida esta carga efectuou-se a descarga das lajes e em seguida as operações de reforço.

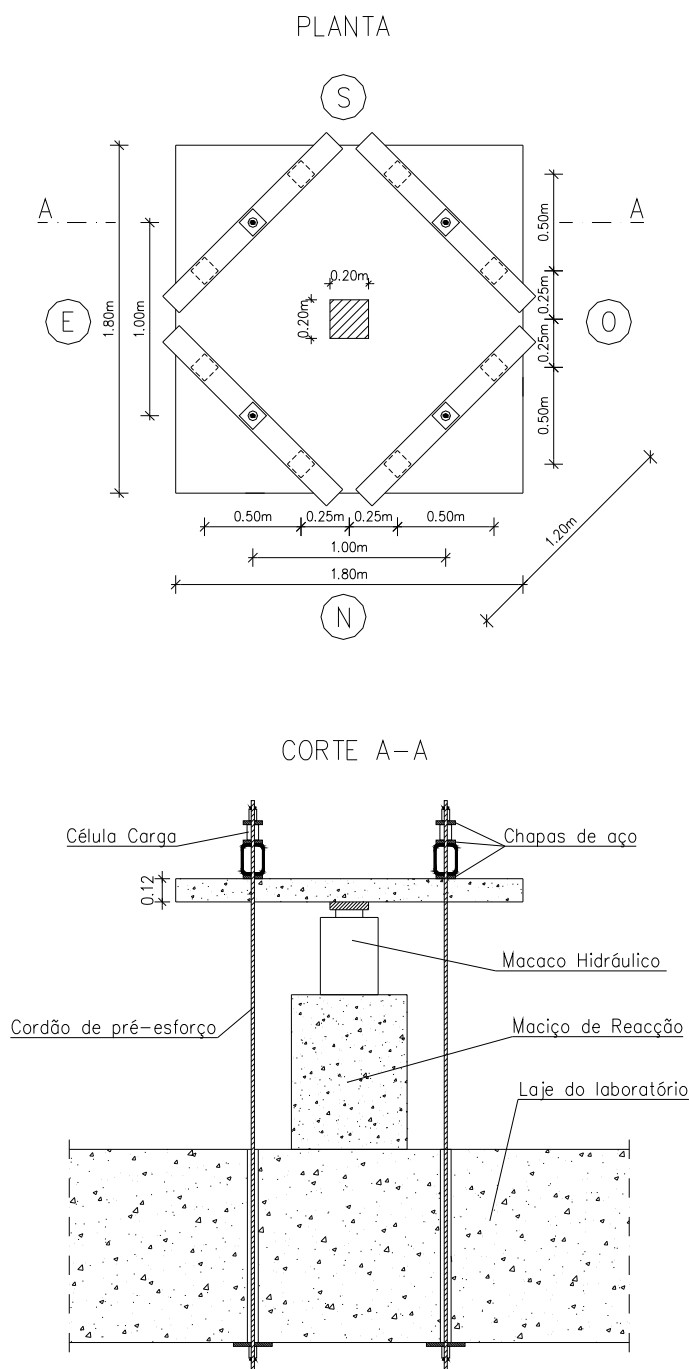


Figura 2.22 – Definição geométrica dos modelos

Na segunda fase foram colocados os parafusos transversais de reforço, ancorados às faces inferior e superior com placas de aço de dimensões $150 \times 50 \text{ mm}^2$ e espessura de 5 mm. Após esta operação os modelos foram novamente carregados, desta vez até à rotura.

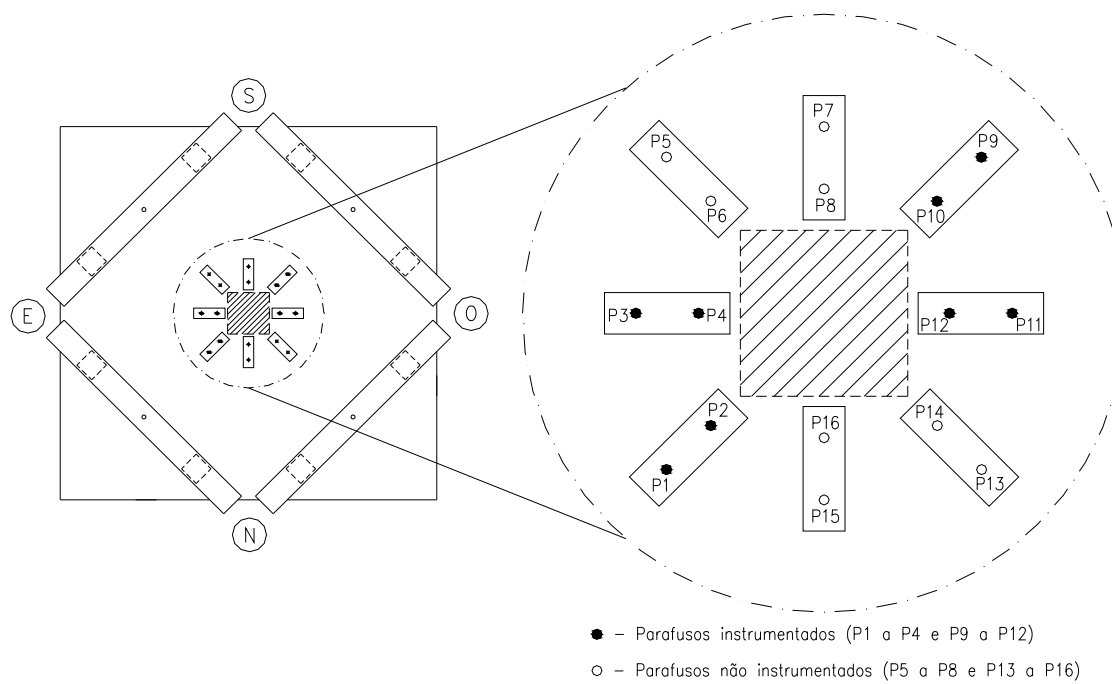


Figura 2.23 – Esquema do reforço e localização dos extensômetros

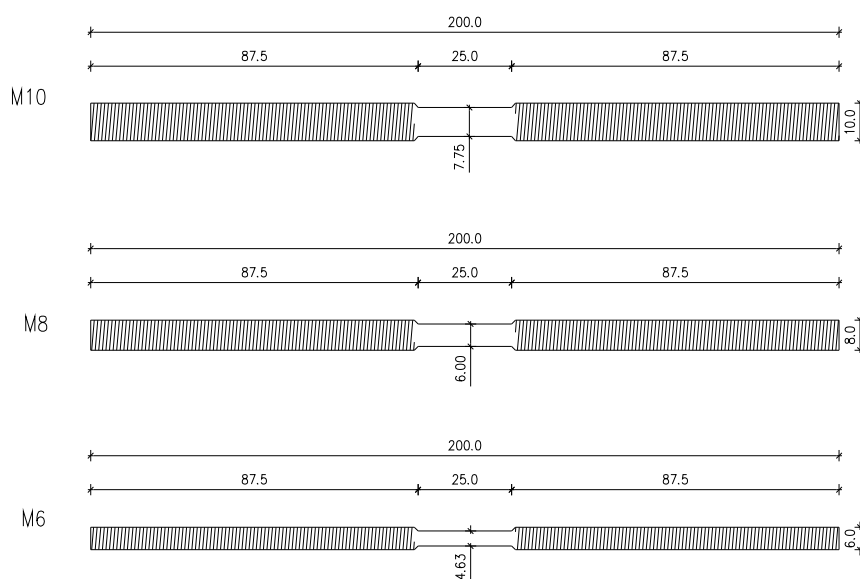


Figura 2.24 – Geometria dos parafusos utilizados

Quadro 2.7 – Resumo dos ensaios experimentais

Modelo	Parafusos de reforço	Força inicial média nos parafusos (kN)	Carga de rotura (kN)	Carga de rotura modelo reforçado Carga rotura ID1
ID2	M10	11.2	405.9	1.51
ID3	M6	3.3	330.8	1.23
ID4	M8	5.9	380.7	1.41
ID5	M8	1.4	366.3	1.36

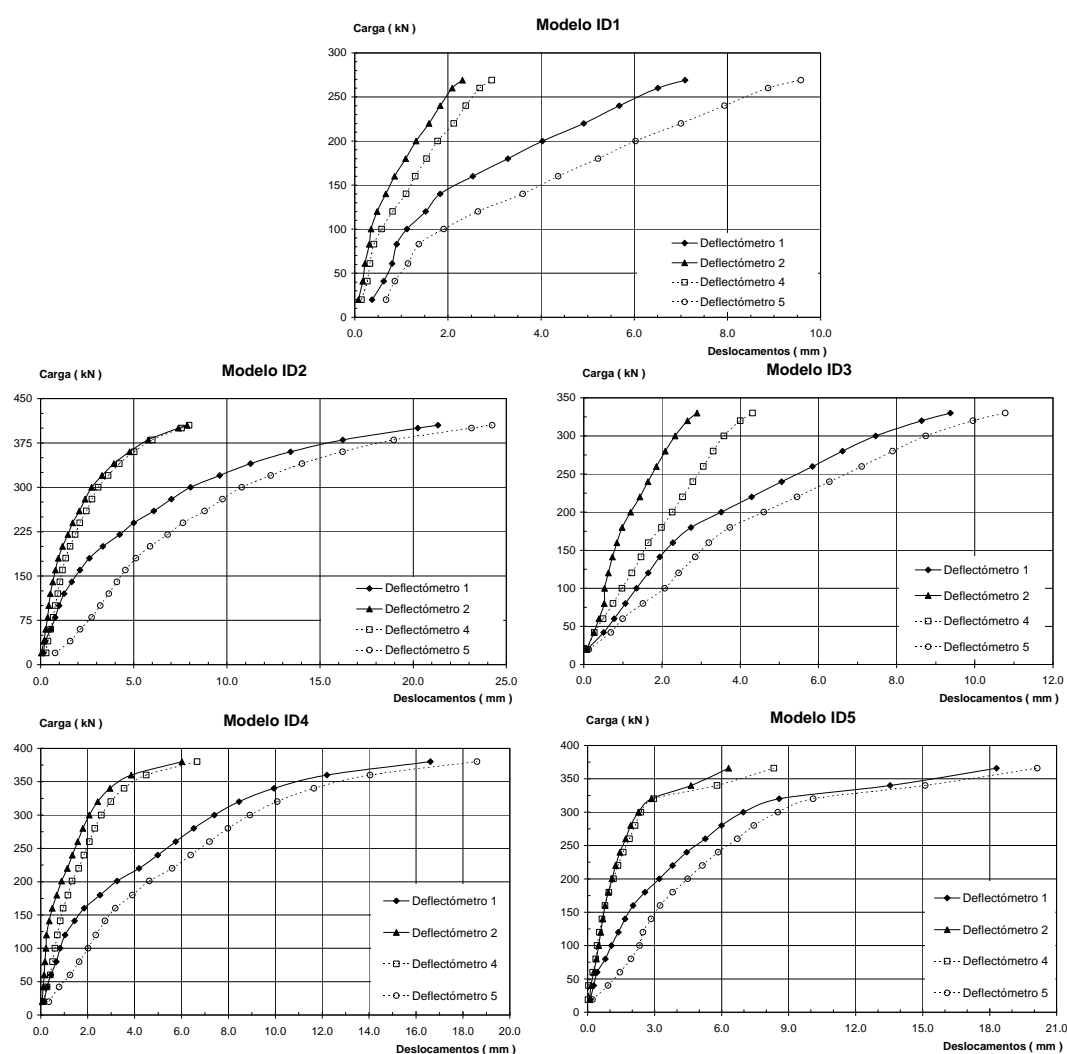


Figura 2.25 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga aplicada dos vários modelos

Os cinco deflectómetros colocados permitiram determinar os deslocamentos relativos em quatro pontos da laje em relação ao centro dos modelos. A evolução destes deslocamentos em função da carga vertical até à rotura é apresentada na figura 2.26.

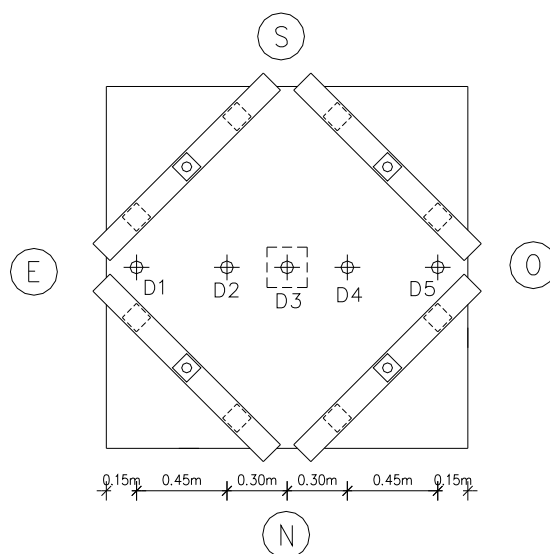


Figura 2.26 – Localização em planta dos deflectómetros

Após a realização dos ensaios removeu-se o betão da zona do cone de punção e foi possível observar e registar as inclinações das superfícies de rotura com a horizontal.

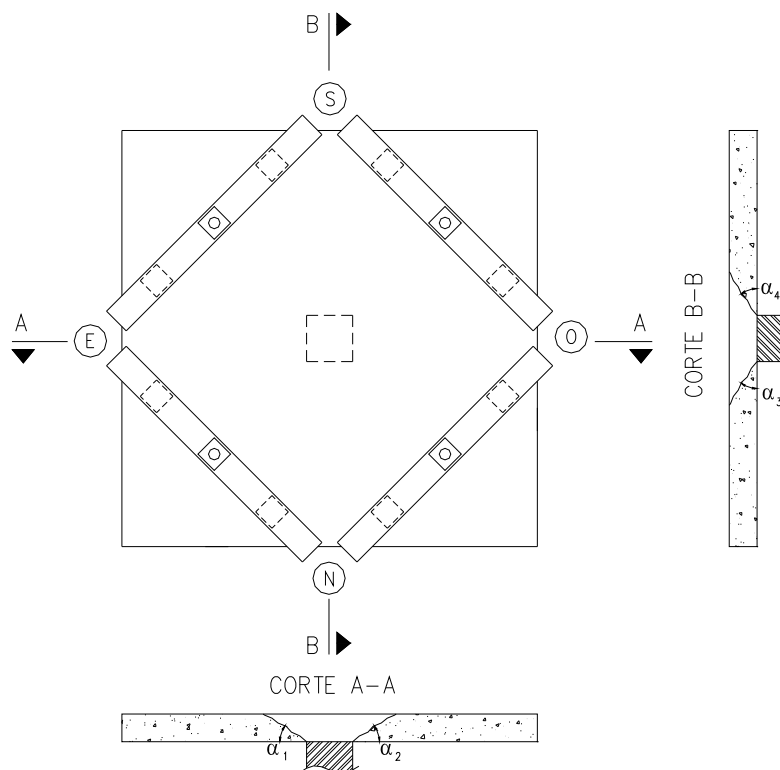


Figura 2.27 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

Quadro 2.8 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

Modelo	$(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ (°)	$(\alpha_3 + \alpha_4)/2$ (°)	$\alpha_{\text{médio}}$ (°)
ID1	30	32	31
ID2	43	45	44
ID3	40	39	40
ID4	46	44	45
ID5	40	43	42

Destes resultados experimentais o autor conclui que a carga de rotura aumenta quando se utiliza parafusos de maior diâmetro, já que o reforço com parafusos M10 conduziu a um acréscimo de resistência de 52 %, enquanto que a utilização dos parafusos M8 conduziu a um aumento de 29 e 21%. Os parafusos M6 foram os que providenciaram menor acréscimo de resistência, cerca de 16%. Todos estes valores são em relação ao modelo de referência.

O incremento da força de pré-esforço aumentou a resistência ao punçoamento em 8% e provocou uma alteração da posição da superfície de rotura, que passou do interior do reforço para o exterior deste.

Com a utilização de parafusos M10 observou uma mudança da posição da superfície de rotura relativamente ao modelo de referência. A superfície passou a intersectar a face em compressão para além das placas de ancoragem

Conclui ainda que a utilização dos parafusos de reforço, nos modelos ID2 a ID5, aumentou a rigidez, que se traduziu numa diminuição da deformação vertical para o mesmo nível de carga.

Relativamente à inclinação da superfície de rotura, verificou-se um aumento desta nos modelos reforçados com parafusos. Verificou-se também que o diâmetro dos parafusos e a quantidade de força de aperto aplicada aos mesmos, não influenciaram significativamente a inclinação da superfície de rotura.

De um modo geral verificou que esta técnica de reforço é bastante eficaz no aumento da resistência ao punçoamento e é de simples e rápida execução.

2.5 Regulamentos

De um modo geral para definir a resistência ao punçoamento os regulamentos apresentam expressões obtidas empiricamente que limitam a tensão de corte num determinado perímetro de referência. São aqui apresentados por ordem cronológica.

2.5.1 REBAP

No Regulamento de Estruturas em Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP) [22] o perímetro do contorno referência é definido por uma linha fechada envolvendo a área carregada a uma distância não inferior a $d/2$ e cujo perímetro é mínimo (Figura 2.28).

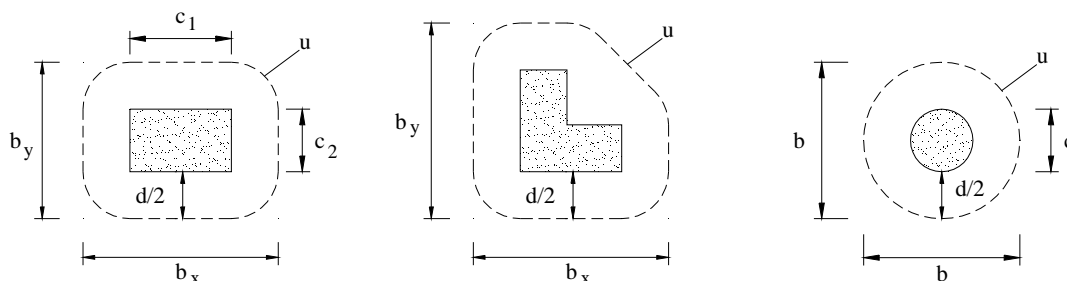


Figura 2.28 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (REBAP)

A resistência ao punçoamento sem armaduras específicas é dada por:

$$V_{Rd} = \eta \tau_1 u d \quad (2.1)$$

onde:

$$\eta = (1.6 - d) \geq 1 \quad d \text{ em metros}$$

$$\tau_1 = 0.6 \frac{f_{ctk}}{\gamma_c}$$

u – perímetro de contorno de referência

d – altura útil

f_{ctk} – valor característico da resistência à tracção

O perímetro da área carregada é limitado a $3.5\pi d$. Em geral fora deste limite considera-se um problema de esforço transversal em que a resistência é cerca de 60% desta.

Quando existe pré-esforço que origine tensões de compressão no plano da laje, o valor de cálculo do esforço resistente de punçoamento é calculado pelo V_{Rd} multiplicado pelo seguinte factor:

$$1 + \frac{M_0}{M_{sd}} \leq 2 \quad (2.2)$$

em que:

M_0 – momento de descompressão da secção

M_{sd} – valor de cálculo do momento actuante

Pode-se subtrair ao esforço de punçoamento actuante, a componente vertical do pré-esforço dos cabos que passam dentro do perímetro do contorno de referência, no caso de lajes pré-esforçadas com cabos inclinados.

No REBAP a armadura de pré-esforço não intervêm no cálculo da percentagem geométrica de armadura de flexão, visto que se considera um valor fixo de 1% para esta grandeza.

Caso existam armaduras específicas de punçoamento, o valor de cálculo do esforço resistente ao punçoamento pode ser determinado usando a seguinte expressão:

$$V_{Rd} = \frac{4}{3} \times \frac{A_{sw}}{s} \times f_{syd} \times \sin \alpha \quad (2.3)$$

onde,

f_{syd} – valor de cálculo da tensão de cedência do aço limitada a 350 MPa

A_{sw} – área num perímetro em torno do pilar de armadura de punçoamento (mm^2)

α – ângulo entre a armadura de punçoamento e o plano da laje

s – espaçamento entre armaduras

O REBAP limita o esforço resistente ao punçoamento, nos casos em que existe armadura específica a 1.6 vezes o V_{Rd} calculado para o caso em que não existe armadura específica.

2.5.2 CEB – FIP Model Code de 1990

No CEB – FIP Modelo Code de 1990 [5] define-se o contorno de referência, u , por uma linha fechada que dista $2d$ da área carregada e cujo o perímetro é mínimo (Figura 2.29).

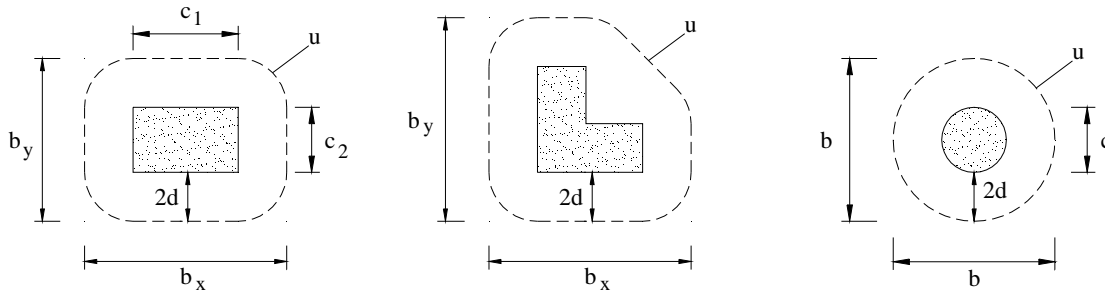


Figura 2.29 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (MC90)

O valor da resistência ao punçoamento sem armaduras específicas é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd} = 0.12 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d \quad (2.4)$$

onde:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \quad d \text{ em mm} \quad (2.5)$$

f_{ck} – valor característico da resistência à compressão do betão em provetes cilíndricos (MPa) limitada a 50 MPa

$$\rho = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0.02 \quad (2.6)$$

ρ_{ly} , ρ_{lz} – percentagens geométricas das armaduras de flexão da laje segundo y e z, respectivamente. Os valores de ρ_{ly} e ρ_{lz} devem ser calculados como valores médios numa largura igual à do pilar adicionada de $2d$ para cada lado.

Nos casos em que existam armaduras específicas de punçoamento, o valor de cálculo do esforço resistente ao punçoamento é determinado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd} = 0.09 \xi (100 \rho f_{ck})^{1/3} u d + 1.5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{syd} \sin \alpha \quad (2.7)$$

onde:

s_r – afastamento radial entre camadas de armadura

f_{syd} – valor de cálculo da tensão de cedência do aço limitada a 300 MPa

Na expressão 2.7 o valor do f_{ck} deve ser limitado a 50 MPa.

O limite máximo para a resistência ao punção é dado por:

$$V_{Rd} \leq 0.5 f_{cd2} u_0 d \quad (2.8)$$

onde:

$$f_{cd2} = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} \quad (2.9)$$

f_{cd} – valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão

u_0 – perímetro da área carregada

2.4.3 ACI 318 – 08 (1)

Neste documento [1] o contorno de referência é definido a uma distância $d/2$ do pilar ou área carregada (figura 2.30).

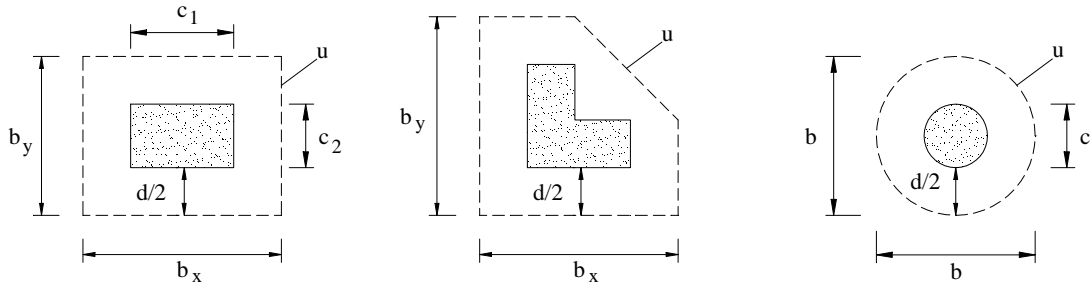


Figura 2.30 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (ACI 318-08)

Para lajes fungiformes sem armadura específica, a resistência ao punção é definida como sendo o menor dos valores obtidos pelas seguintes expressões:

$$V_{Rd} = \left(1 + \frac{2}{\beta_c} \right) \frac{\sqrt{f_{ck}} u d}{6} \phi_c \quad (2.10)$$

$$V_{Rd} = \left(\alpha_s \frac{d}{u} + 2 \right) \frac{\sqrt{f_{ck}} u d}{12} \phi_c \quad (2.11)$$

$$V_{Rd} = \frac{1}{3} \sqrt{f_{ck}} u d \phi_c \quad (2.12)$$

em que:

β_c – quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar

ϕ_c – coeficiente de segurança do betão ($\phi_c = 0.85$)

$$\alpha_s = \begin{cases} 40 & \text{para pilares interiores} \\ 30 & \text{para pilares de bordo} \\ 20 & \text{para pilares de canto} \end{cases}$$

Caso existam armaduras específicas de punçoamento o ACI 318-08 define o valor de cálculo do esforço resistente ao punçoamento como sendo:

$$V_{Rd} = \left(\frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} u d + A_{sw} f_{syd} \sen \alpha \right) \phi_c \quad (2.13)$$

respeitando o seguinte valor limite:

$$A_{sw} f_{syd} \sen \alpha \leq \frac{1}{3} \sqrt{f_{ck}} u d \quad (2.14)$$

Nas duas ultimas expressões a tensão de cedência do aço utilizado na armadura de punçoamento não deve ultrapassar o valor de 414 MPa.

2.4.4 Eurocódigo 2

O Eurocódigo 2 (EC2) [6] indica que o perímetro de contorno de referência deve ser considerado a uma distância $2.0d$ da área carregada, ou do perímetro do pilar (ver figura 2.31). Este perímetro deve ser construído de modo a minimizar o seu comprimento.

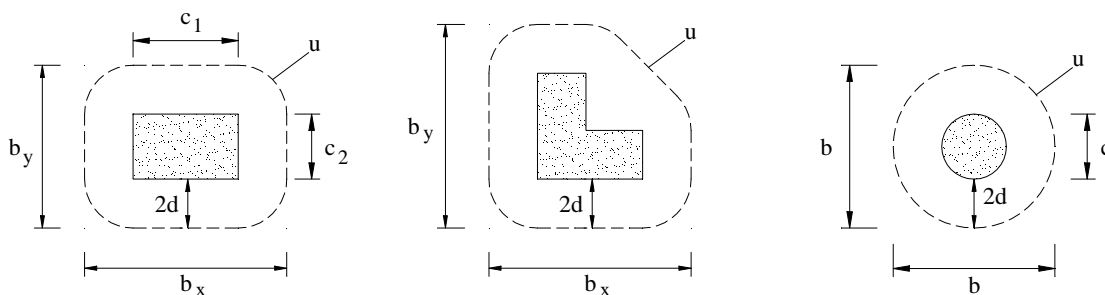


Figura 2.31 – Perímetro de contorno de referência em redor da área carregada (EC2)

O valor de cálculo da resistência ao punçoamento sem armaduras específicas é dado pela seguinte expressão:

$$v_{Rd,c} = \frac{0.18}{\gamma_c} \times k \times (\rho_l \times f_{ck})^{1/3} \geq 0.035 \times k^{3/2} \times f_{ck}^{1/2} \quad (2.15)$$

onde:

$V_{Rd,c}$ – valor de cálculo da tensão de resistência ao punçoamento sem armadura específica

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad d \text{ em mm} \quad (2.16)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \leq 0.02 \quad (2.17)$$

ρ_{ly} , ρ_{lz} – percentagens geométricas das armaduras de flexão da laje segundo y e z, respectivamente. Os valores de ρ_{ly} e ρ_{lz} devem ser calculados como valores médios numa largura igual à do pilar adicionada de $3d$ para cada lado

f_{ck} – valor característico da resistência à compressão do betão (MPa)

γ_c – coeficiente de segurança do betão

Quando existem armaduras de punçoamento, o valor de cálculo da resistência ao punçoamento é calculado pela seguinte expressão:

$$V_{Rd,cs} = 0.75 V_{Rd,c} + 1.5 \frac{d}{s_r} A_{sw} f_{ywd,ef} \frac{\sin \alpha}{u_1 d} \quad (2.18)$$

onde:

A_{sw} – área num perímetro em torno do pilar de armadura de punçoamento (mm²)

s_r – espaçamento radial dos perímetros da armadura de punçoamento (mm)

$f_{ywd,ef}$ – valor de cálculo efectivo da resistência da armadura de punçoamento, limitado ao seguinte valor: $f_{ywd,ef} = 250 + 0.5 \frac{d}{s_r} \leq f_{ywd}$ (Mpa)

d – altura útil (mm)

α – ângulo entre a armadura de punçoamento e o plano da laje

(caso seja utilizada apenas uma linha de barras inclinadas, deve-se considerar para d/s_r um valor de 0.67)

Capítulo 3

Estudo experimental

3.1 Introdução

Neste capítulo é estudado experimentalmente o punçoamento cíclico de lajes fungiformes reforçadas com parafusos verticais pré-esforçados, que atravessam a laje em toda a sua espessura. Para estes ensaios foram elaborados na CONCREMAT modelos à escala de laje fungiforme maciça. Os resultados obtidos são comparados com os resultados de Duarte [2, 3], já apresentados no capítulo 2, que ensaiou três modelos de características iguais sujeitos a carregamentos crescentes monotónicos.

Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Os resultados experimentais obtidos são comparados com os valores previstos usando o preconizado pelo CEB-FIP Model Code 1990 [5], o Eurocódigo 2 [6] e o ACI318 – 08 [1].



Figura 3.1 – Laboratório de Estruturas da FCT – UNL

3.2 Descrição dos modelos ensaiados

Os modelos à escala de laje fungiforme maciça têm dimensões em planta de $1800 \times 1800 \text{ m}^2$ e uma espessura de 120 mm. Estes modelos simulam a zona de momentos negativos junto ao pilar limitada pelas linhas de inflexão onde os momentos flectores são nulos. O pilar foi materializado por uma placa de aço de dimensões $200 \times 200 \text{ mm}^2$ e 50 mm de espessura.

A armadura superior é constituída por uma malha quadrada de $\phi 10//0.075$ e a inferior por uma malha quadrada de $\phi 6//0.20$. O recobrimento é de aproximadamente 20 mm na face superior e 10 mm na face inferior. A armadura longitudinal superior com maior altura útil foi colocada na direcção y. Estas armaduras foram determinadas com o objectivo de se obter uma rotura por punçoamento.

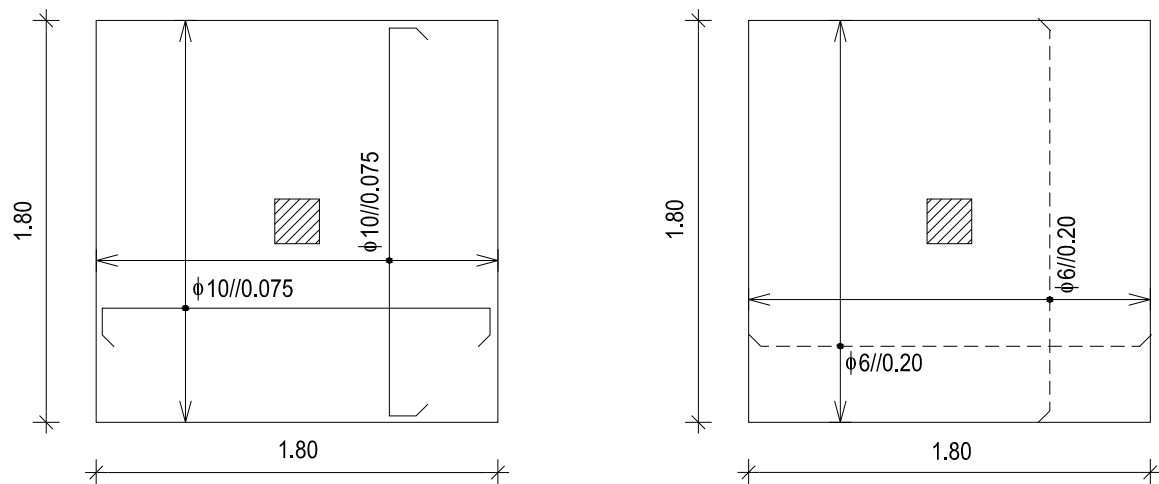


Figura 3.2 – Armaduras longitudinais dos modelos

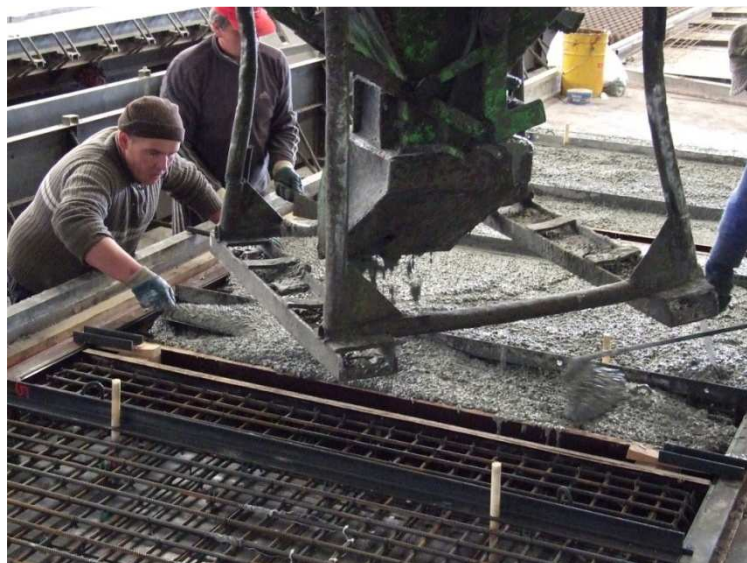


Figura 3.3 – Betonagem dos modelos

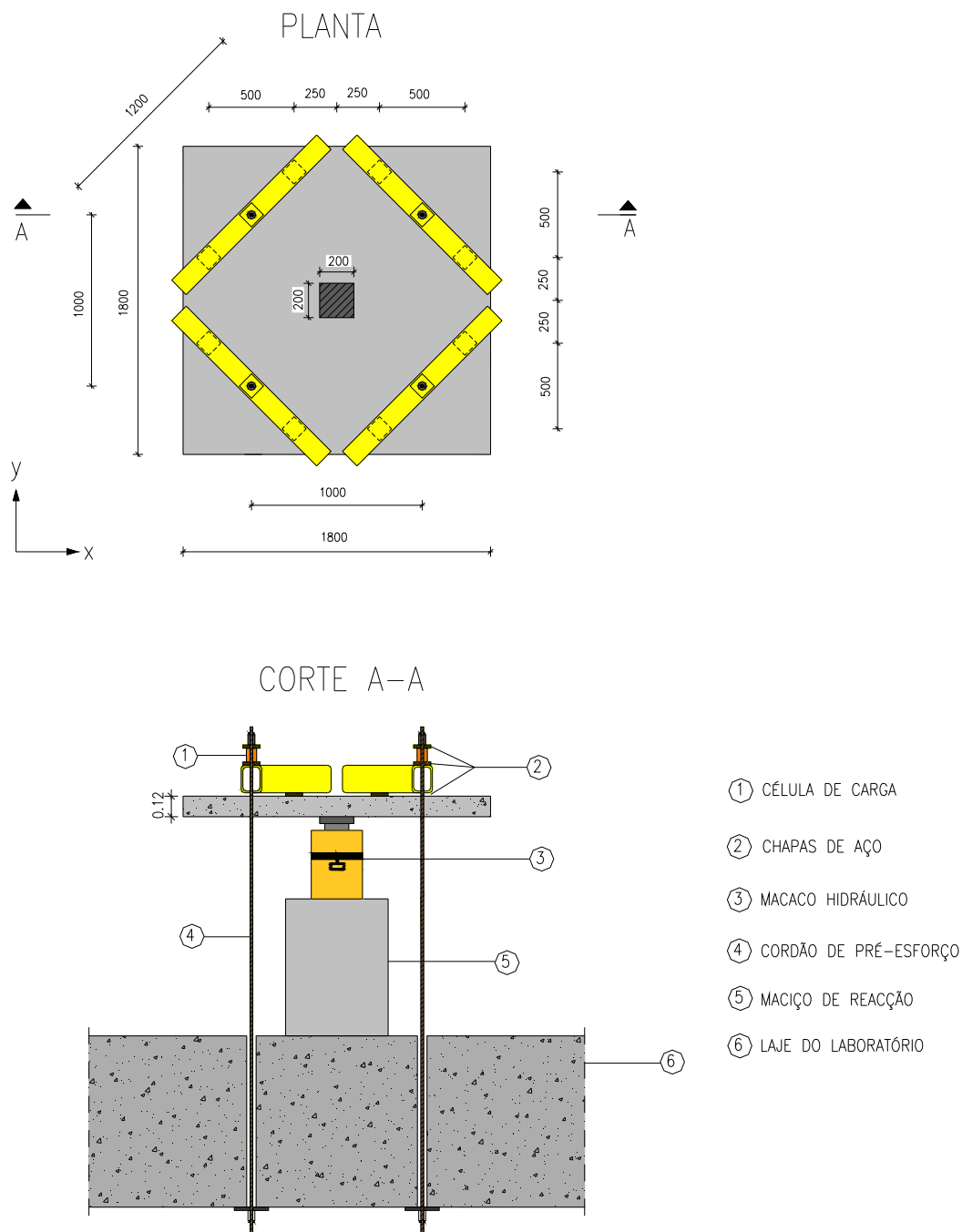
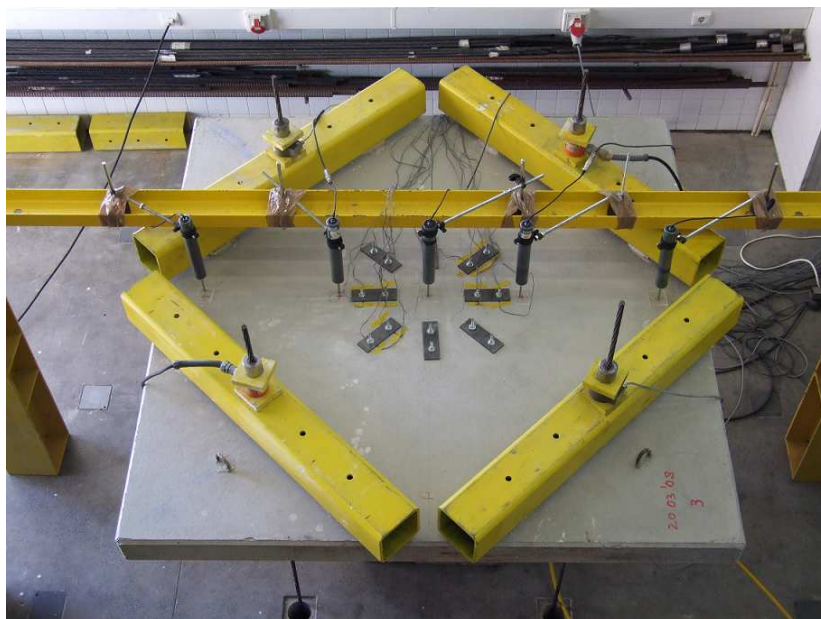


Figura 3.4 – Definição geométrica dos modelos

Durante a execução dos modelos foi feito um levantamento altimétrico das armaduras, tendo sido medidos os valores de altura útil média (d) em cada um deles. O quadro seguinte apresenta os valores determinados.

Quadro 3.1 – Altura útil média dos modelos

Modelo	R	M6	M8	C6	C8
d (mm)	87.1	89.5	90.3	93.6	94.5

**Figura 3.5** – Aspecto geral do ensaio

3.3 Condições de fronteira e carregamento

Sabendo que os limites do modelo são as linhas de momentos nulos e a carga é aplicada na zona central, simulou-se esta situação em termos de condições de fronteira cinemáticas nos bordos dos modelos, libertando as rotações e impedindo os deslocamentos verticais, através da utilização de quatro perfis metálicos RHS, sob os quais são colocadas oito placas de aço com dimensões de $100 \times 100 \times 20 \text{ mm}^3$. Os perfis metálicos são fixos à laje de reacção do laboratório através de quatro cabos de pré-esforço de alta resistência com diâmetro de 0.6''.

O carregamento é efectuado através de um macaco hidráulico (ENERPAC RRH 1006) que aplica uma força no pilar central, materializado por uma placa de aço, $200 \times 200 \text{ mm}^2$, com rigidez suficiente para manter a superfície de contacto plana (50 mm de espessura).



Figura 3.6 – Carregamento efectuado através de um macaco hidráulico

3.4 Caracterização dos materiais

Foram caracterizados, em termos de propriedades mecânicas, o betão e a armadura longitudinal dos modelos bem como o aço dos parafusos de reforço.

Para caracterizar o betão dos modelos foram realizados ensaios de compressão, segundo a norma NP EN 12390-3 [14], em seis provetes cúbicos de 150 mm de lado em cada modelo. Na preparação e cura destes provetes, foi seguido o recomendado pelas normas NP EN 12390-1 [12] e NP EN 12390-2 [13]. Os resultados obtidos dos ensaios de compressão são apresentados no quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Propriedades mecânicas do betão

Modelo	f_{ccm} (Mpa)	f_{cm} (MPa)	E_c (GPa)	Dias
R	49,2	39,3	28,9	65
M6	59,6	47,7	30,8	99
M8	59,7	47,7	30,8	99
C6	49,3	39,4	28,9	111
C8	49,3	39,4	28,9	106

A tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos, f_{ccm} , foi obtida através da média dos resultados experimentais alcançados. A tensão média de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos, f_{cm} , foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_{cm} = 0.8 \cdot f_{ccm} \quad (f_{ccm} < 60 \text{ MPa}) \quad (3.1)$$

Para calcular o módulo de elasticidade do betão (E_c), através dos resultados experimentais, utilizou-se a seguinte expressão:

$$E_c = 8.482 \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (f_{cm} \text{ em MPa}) \quad (3.2)$$

A armadura longitudinal de aço laminado a quente e rugoso (NR) também foi caracterizada através de ensaios de tracção (segundo a NP EN 10002 – 1 [11]) de quatro provetes de cada diâmetro utilizado. Os valores da tensão de cedência (f_{sy}) e da tensão de rotura à tracção (f_{su}) são apresentados no quadro 3.3. Os varões ensaiados foram instrumentados com dois extensómetros diametralmente opostos, o que permitiu elaborar os gráficos apresentados que relacionam as tensões com as deformações.

Quadro 3.3 – Propriedades mecânicas do aço da armadura longitudinal

Aço	Ø 6	Ø 10
f_{sy} [MPa]	588	445
f_{su} [MPa]	697	582

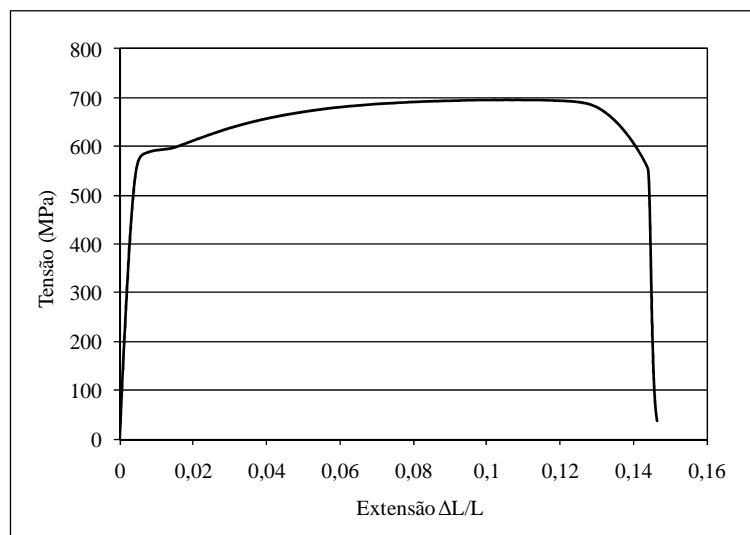


Figura 3.7 – Evolução da tensão com a extensão de um varão de Ø 6

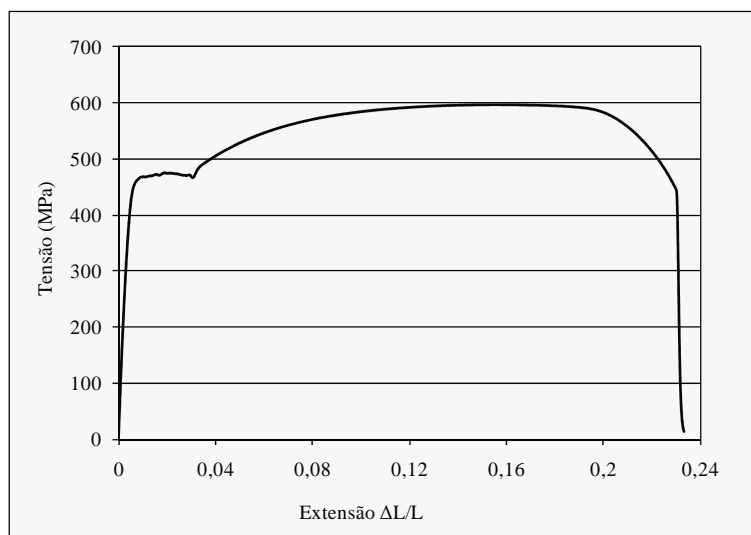


Figura 3.8 – Evolução da tensão com a extensão de um varão de Ø 10

Nos ensaios realizados foram utilizados dois tipos de parafusos de reforço com a geometria apresentada na figura. Estes parafusos foram obtidos a partir de varões roscados e apresentam uma diminuição da secção no centro para facilitar a colocação dos extensómetros, sendo S_0 a secção transversal dos parafusos na zona central sem rosca.

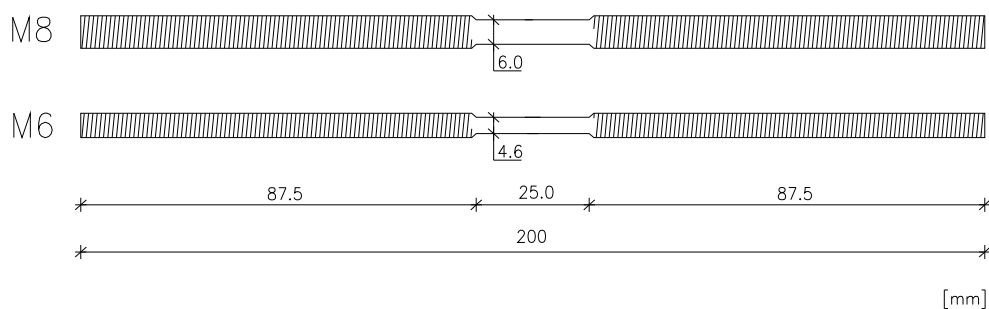


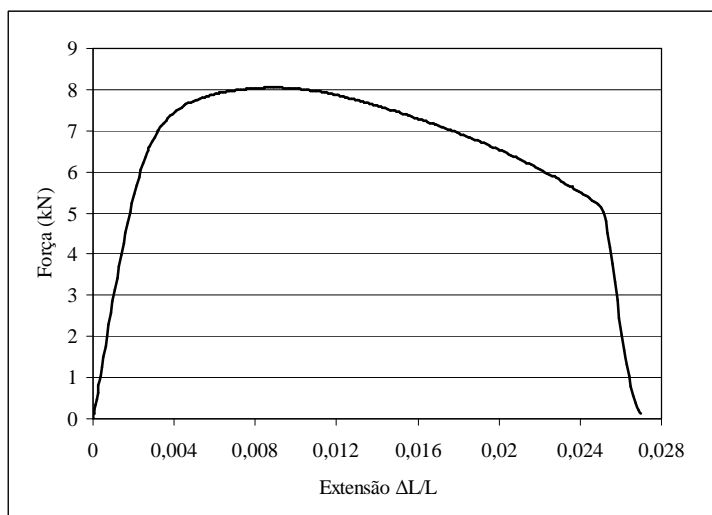
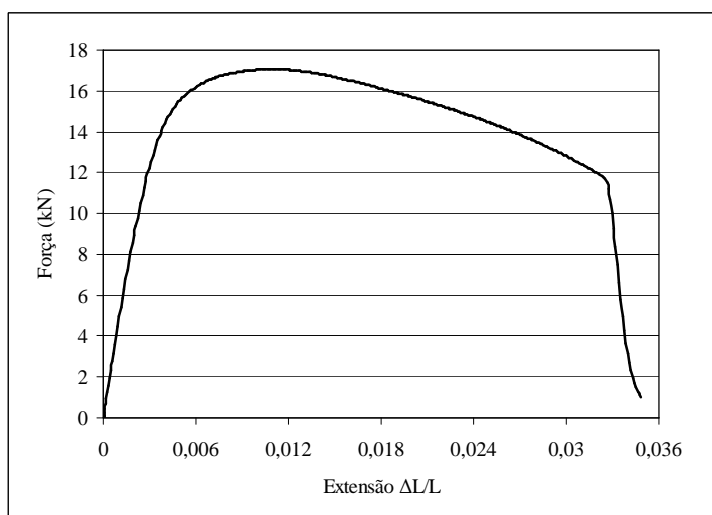
Figura 3.9 – Geometria dos parafusos de reforço utilizados (M6 e M8)

No Quadro 3.4 apresentam-se os resultados experimentais, em que $F_{p0.2}$ é a força limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos, F_u é a força de rotura à tracção média dos parafusos, $\sigma_{p0.2}$ é a tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2% média do aço dos parafusos e σ_u é a tensão média de rotura à tracção dos parafusos.

Quadro 3.4 – Propriedades do aço de reforço

Parafuso	S_0 (mm ²)	$F_{p0.2}$ (kN)	F_u (kN)	$\sigma_{p0.2}$ (Mpa)	σ_u (Mpa)
M6	16.6	7.6	8.0	458	482
M8	28.3	15.5	17.1	548	604

Estes parafusos foram também instrumentados com dois extensómetros o que permitiu também elaborar gráficos de força – extensão.

**Figura 3.10** – Evolução da força de um parafuso M6 com a extensão**Figura 3.11** – Evolução da força de um parafuso M8 com a extensão

3.5 Instrumentação dos ensaios

Para quantificar as extensões nas armaduras longitudinais superiores foram colados 6 extensómetros, 2 por varão e diametralmente opostos, em 3 varões da armadura longitudinal superior com maior altura útil. Estes extensómetros foram colados alternadamente a partir do centro do pilar, sendo o espaçamento entre varões instrumentados de 150 mm. Os extensómetros utilizados são do tipo FLA-5-11 da TML. Na Figura 3.12 é possível observar as armaduras instrumentadas antes da betonagem dos modelos.

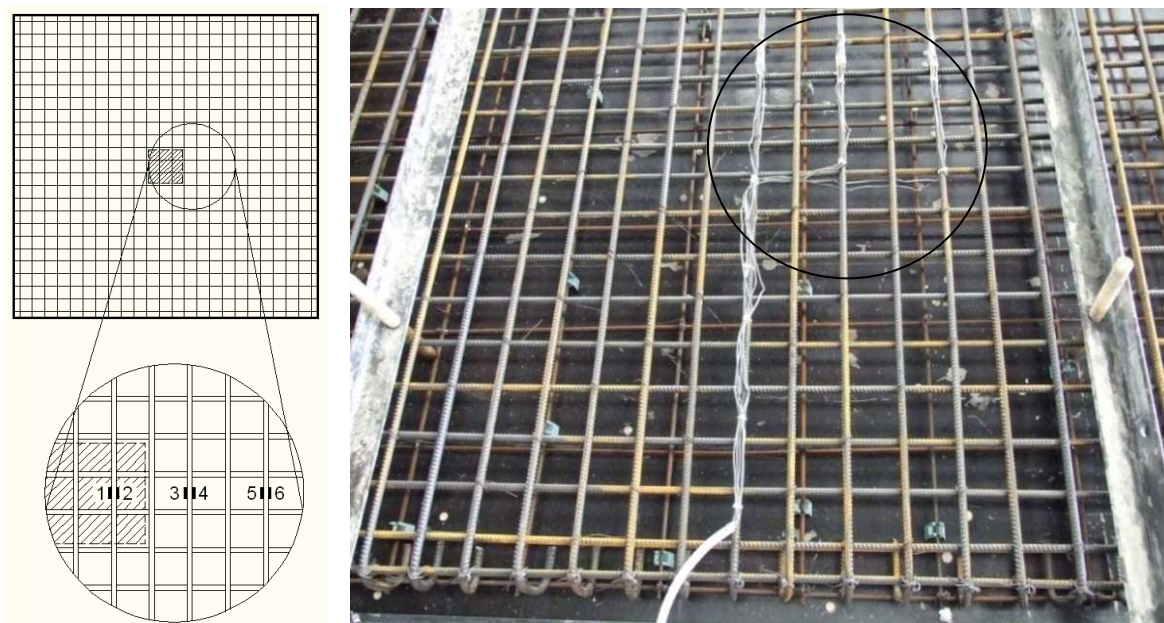


Figura 3.12 – Armaduras instrumentadas antes da betonagem

As extensões nos parafusos de reforço foram também medidas através de 16 extensómetros colados em 8 parafusos (16 extensómetros no total).



Figura 3.13 – Parafusos instrumentados

A carga vertical aplicada aos modelos foi quantificada através de 4 células de carga, duas TML KC-20M e duas HBM C6A, cuja disposição espacial pode ser observada na Figura 3.14.

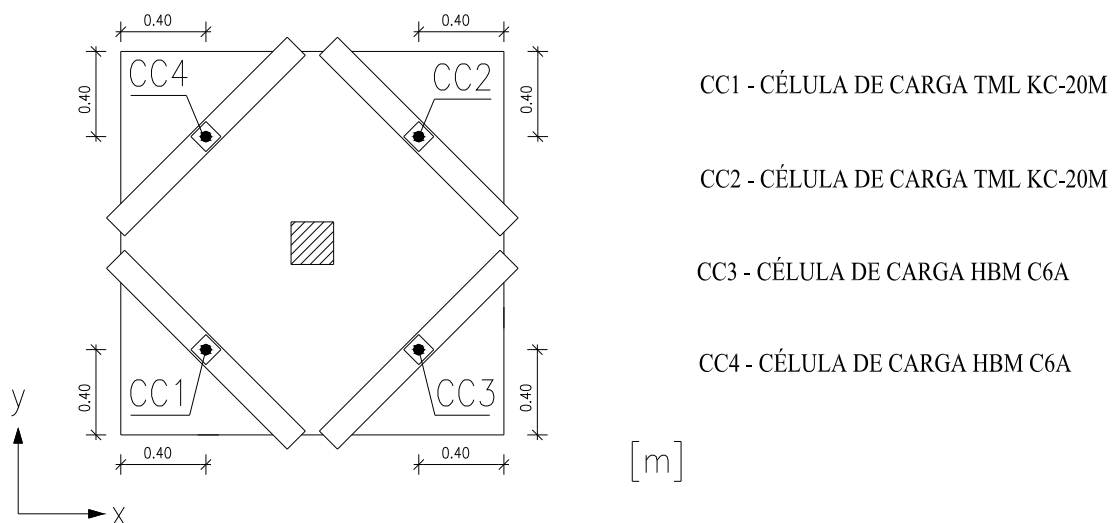


Figura 3.14 – Planta das células de carga

Os deslocamentos verticais da laje foram medidos através de cinco deflectómetros eléctricos colocados ao longo da direcção x de acordo com o apresentado na Figura 3.15.

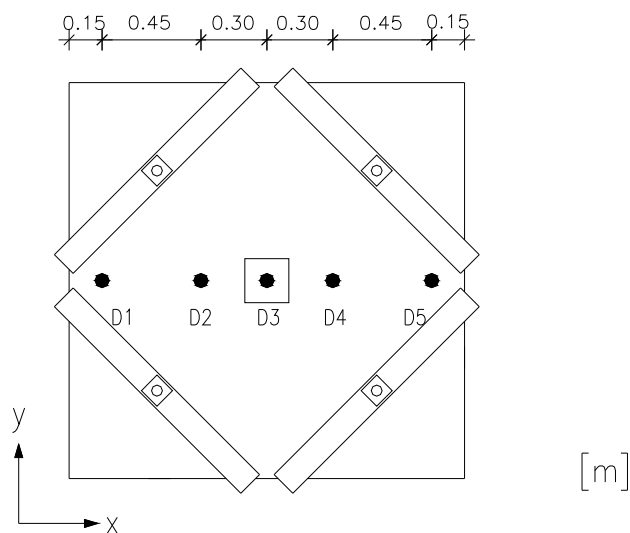


Figura 3.15 – Localização dos deflectómetros em planta



Figura 3.16 – Deflectómetros D1 a D5

A Figura 3.17 mostra as quatro unidades de aquisição de dados em série “Data logger HBM Spider 8” às quais foi ligada toda a instrumentação dos modelos.

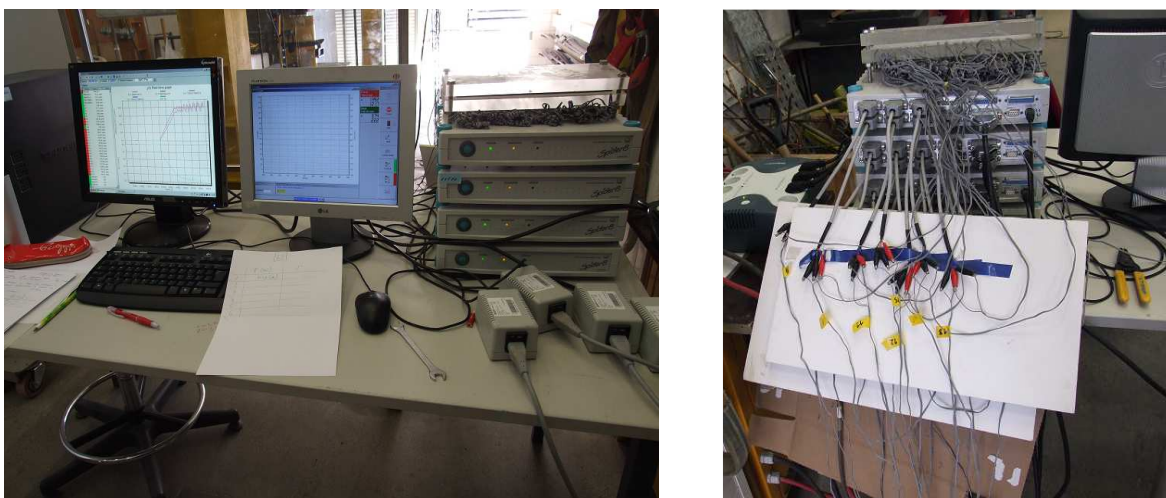


Figura 3.17 – Data logger HBM Spider 8

3.6 Execução dos ensaios

3.6.1 Modelo R

Este é o modelo não reforçado, ou seja, a referência utilizada para comparação com os resultados dos modelos reforçados. O modelo foi ensaiado aos 65 dias, sendo sujeito a um carregamento monotónico e crescente, com uma velocidade constante.

Aos 95 kN tornaram-se visíveis a olho nu as fendas tangenciais à face do pilar e quando a carga vertical atingiu cerca de 110 kN começaram a aparecer as fendas radiais. A carga vertical de rotura por punçoamento foi de 269 kN.

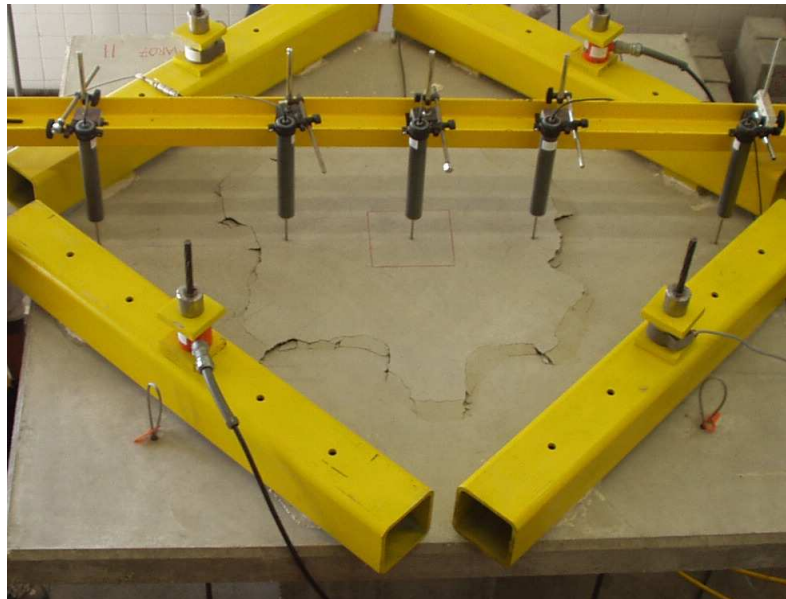


Figura 3.18 – Vista do modelo R após a rotura por punçoamento

3.6.2 Modelos reforçados

Os modelos reforçados foram sujeitos a duas fases distintas de ensaio:

1ª Fase do carregamento

Todos os modelos, excepto o modelo de referência, foram numa primeira fase carregados com uma carga de cerca de 60% da carga de rotura ao punçoamento do modelo de referência. Esta primeira fase do carregamento tinha como objectivo sujeitar os modelos a um nível de carga superior à carga de fendilhação, para simular a situação de laje fendilhada com necessidade duma intervenção de reforço.

No quadro seguinte estão indicados os valores das cargas verticais efectivamente aplicadas aos modelos nesta fase.

Quadro 3.5 – Carga aplicada na 1ª fase

Modelo	Carga da 1ª fase (kN)	% Carga última da laje R
M6	159.9	59
M8	170.5	63
C6	152.3	57
C8	150.4	56

2ª Fase do carregamento

Esta fase inicia-se com a reparação e reforço dos modelos. Após estas operações os modelos são submetidos, no caso dos modelos com o prefixo C, a um carregamento cíclico que consiste na aplicação de três ciclos idênticos, com incrementos de 10 kN em cada patamar, mantendo a carga inferior no mesmo valor (carga de fendilhação). O esquema de carregamento pode ser visto na seguinte Figura 3.19. Nos modelos com prefixo M, o carregamento foi efectuado de forma monotónica até ser atingida a rotura.

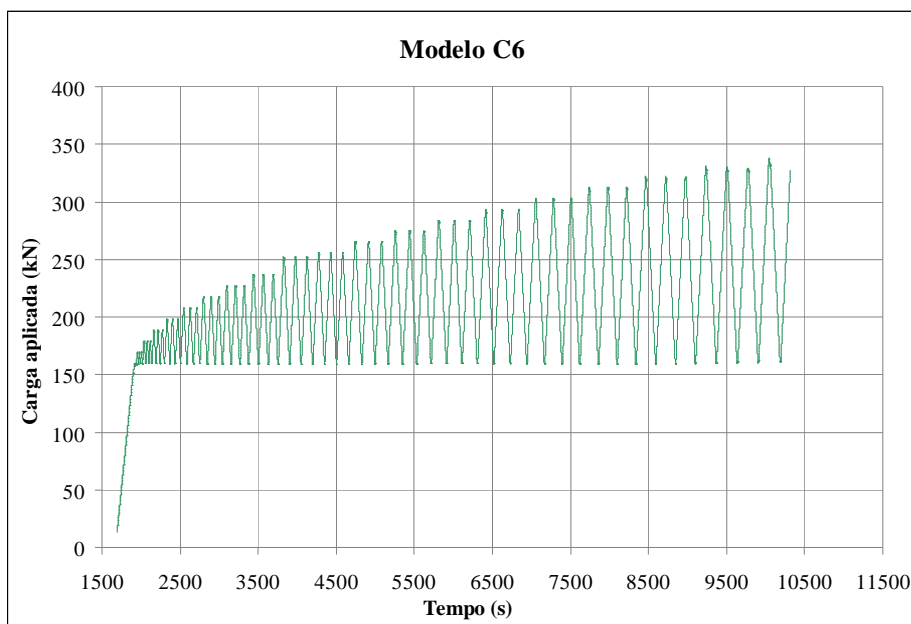


Figura 3.19 – Esquema de carregamento do modelo C6

Nas operações de reforço foram tomadas algumas medidas de prevenção, nomeadamente para não danificar os extensómetros, foram feitas algumas aberturas para os fios passarem e não serem esmagados pelas chapas metálicas como se pode verificar na Figura 3.20.



Figura 3.20 – Face superior dos modelos antes da colocação dos parafusos e reparação da face inferior

Nesta fase foram efectuados dezasseis furos verticais como o auxílio de um berbequim. Na face inferior, foi necessário reparar a zona envolvente dos furos com argamassa, devido ao destacamento de betão superficial na execução dos furos.

Após a reparação da laje, foram colocados os dezasseis parafusos de reforço em duas camadas em torno do pilar como mostra a Figura 3.21. Nos modelos C6 e M6 foram utilizados parafusos obtidos a partir de barras roscadas de 6 mm de diâmetro, enquanto que nos modelos C8 e M8, os parafusos de reforço foram obtidos de barras roscadas de 8 mm de diâmetro. Para ancorar os parafusos em ambas as faces foram utilizadas placas de aço com 150x150x5 mm³ (Figura 3.22).

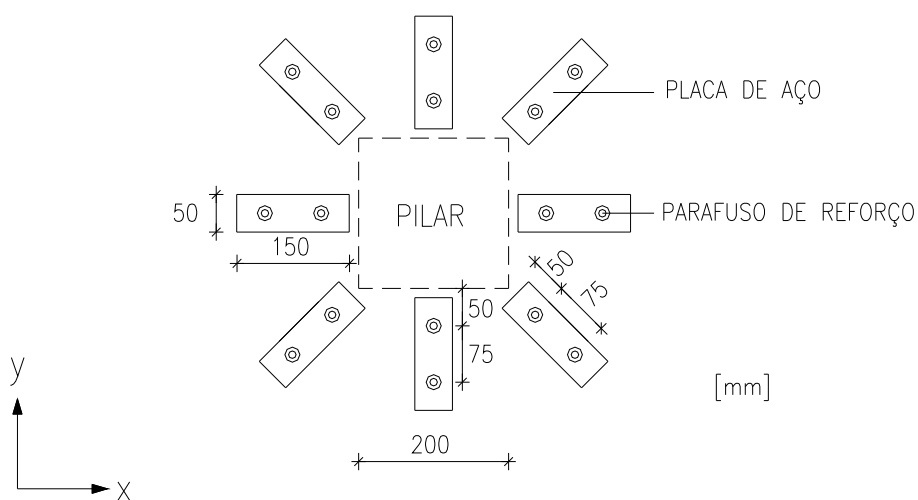


Figura 3.21 – Geometria do reforço dos modelos

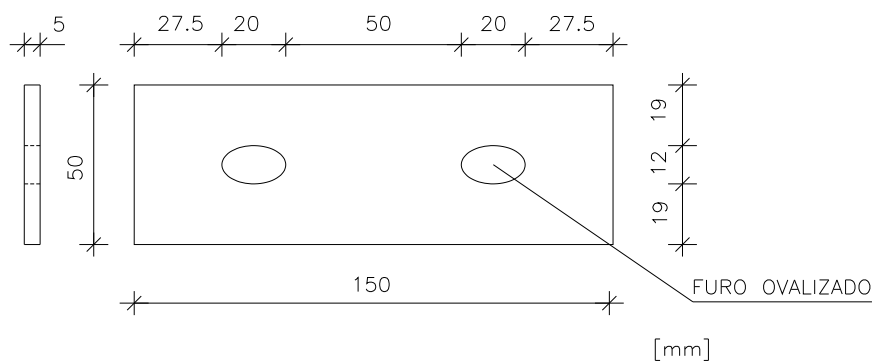


Figura 3.22 – Geometria das chapas de ancoragem dos parafusos

As cargas de rotura, para os ensaios cíclicos e monotónicos, são apresentadas no quadro seguinte.

Quadro 3.6 – Cargas de rotura

Modelo	M6	M8	C6	C8
V_{exp} (kN)	331	381	337	349

3.7 Análise dos resultados

3.7.1 Extensões na armadura longitudinal superior

Neste ponto analisa-se, sobretudo graficamente, a evolução das extensões na armadura longitudinal superior com maior altura útil (direção y) em função da carga vertical aplicada. Para a elaboração dos gráficos considerou-se a média das extensões obtidas no par de extensómetros dos três varões instrumentados.

Para analisar com mais detalhe as tensões nos varões longitudinais instrumentados, foram elaborados também, gráficos das extensões dos mesmos em função das suas respectivas coordenadas ao longo do alinhamento x , para certos patamares de carga.

Nos gráficos apresentados de seguida, o carregamento inicial corresponde a 12.6 kN. Este valor é a soma do peso próprio da laje com o equipamento colocado sobre a mesma.

Para a análise quantitativa dos resultados, foi necessário calcular a extensão de cedência do aço das armaduras longitudinais superiores (ϵ_{sy}):

$$\epsilon_{sy} = \frac{f_{sy}}{E_s} = \frac{445}{190000} = 2.3 \text{ ‰} \quad (3.3)$$

onde,

f_{sy} – tensão de cedência do aço, proveniente dos ensaios de caracterização dos materiais;

E_s – módulo de elasticidade do aço (190 GPa).

Modelo R (referência)

Em geral, as extensões aumentam com o incremento da carga vertical. No seguinte gráfico da evolução das extensões com a carga vertical aplicada identificam-se dois declives distintos. A inclinação do segmento da relação carga-extensão baixa substancialmente devido à perda de rigidez associada ao início da fendilhação do modelo, que começa aos 55 kN de carga vertical (ponto onde se dá a mudança de declive). Somente o varão instrumentado com os extensómetros 1+2, que se encontra sobre o pilar, apresentou

extensões ligeiramente superiores a 2.3‰. Os restantes não atingiram a extensão de cedência.

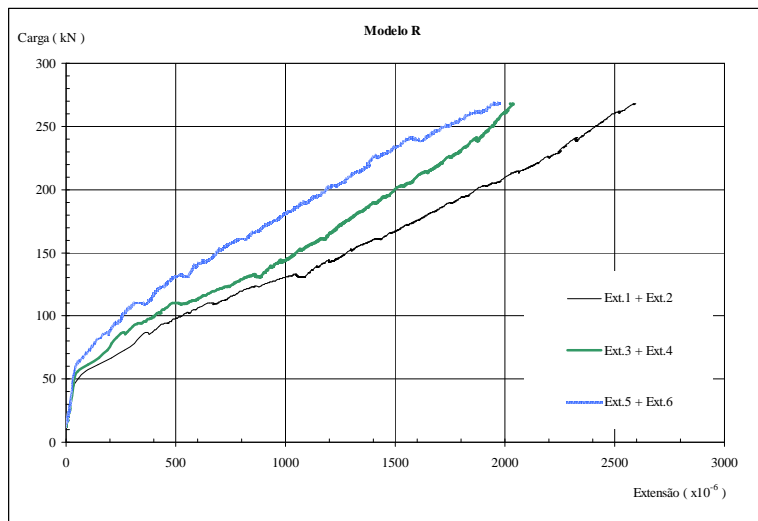


Figura 3.23 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior no modelo R (varões na direcção y)

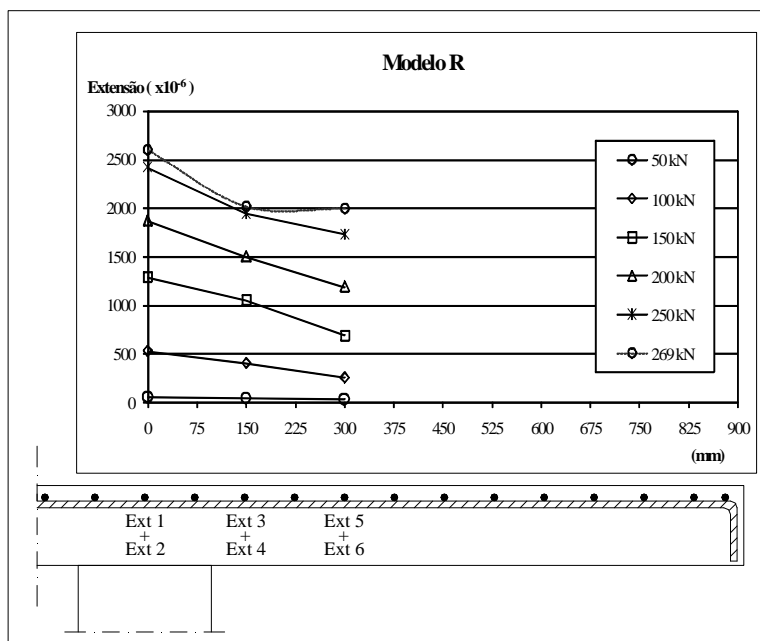


Figura 3.24 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior no modelo R (eixo x)

Na Figura 3.24 são representadas as distribuições transversais de extensões para vários patamares de carga. A evolução da extensão é monotonicamente crescente com a carga vertical aplicada. Os valores máximos das extensões registam-se sobre o pilar.

Modelos C6 e M6 (Fase 1 – Fendilhação)

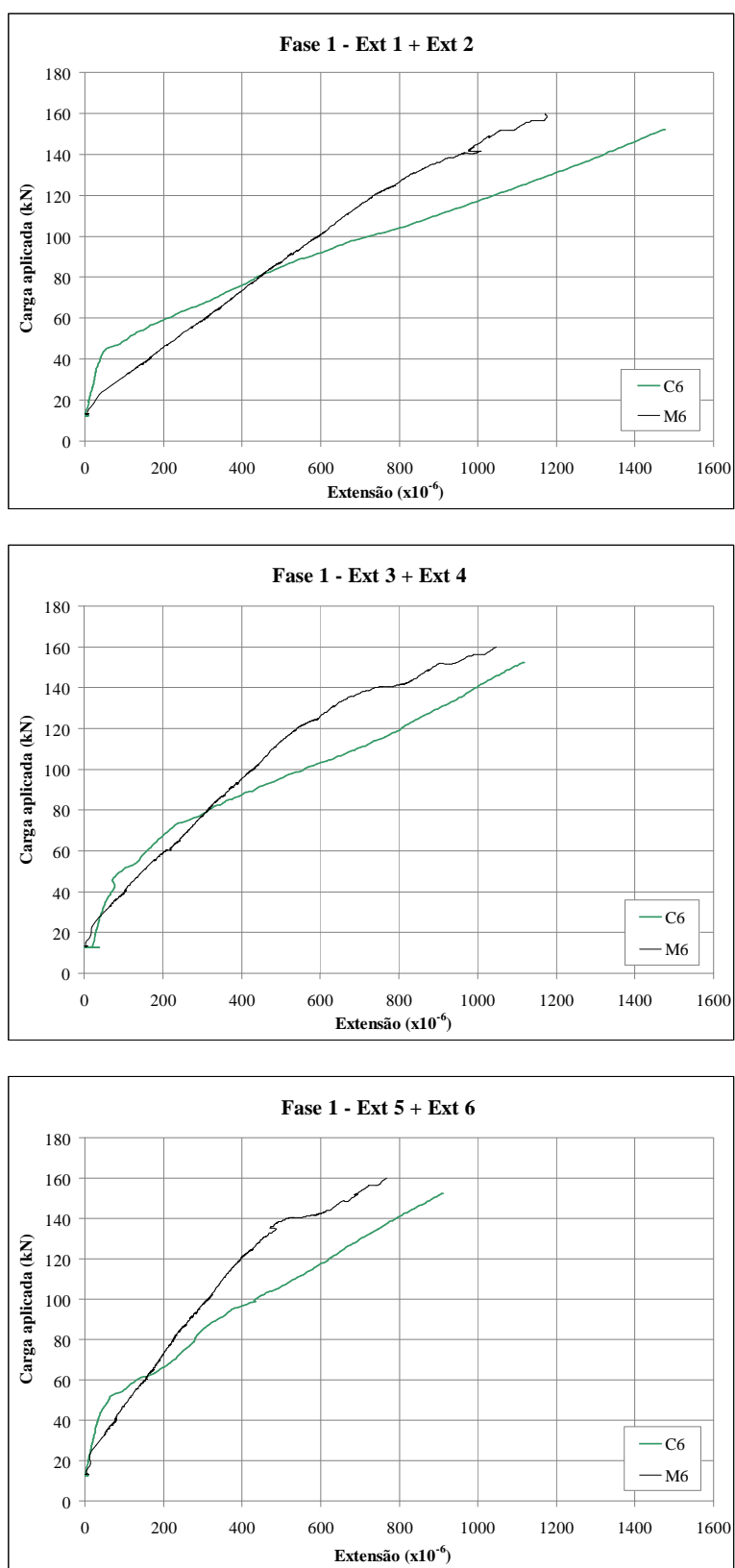


Figura 3.25 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 1
(varões na direcção y)

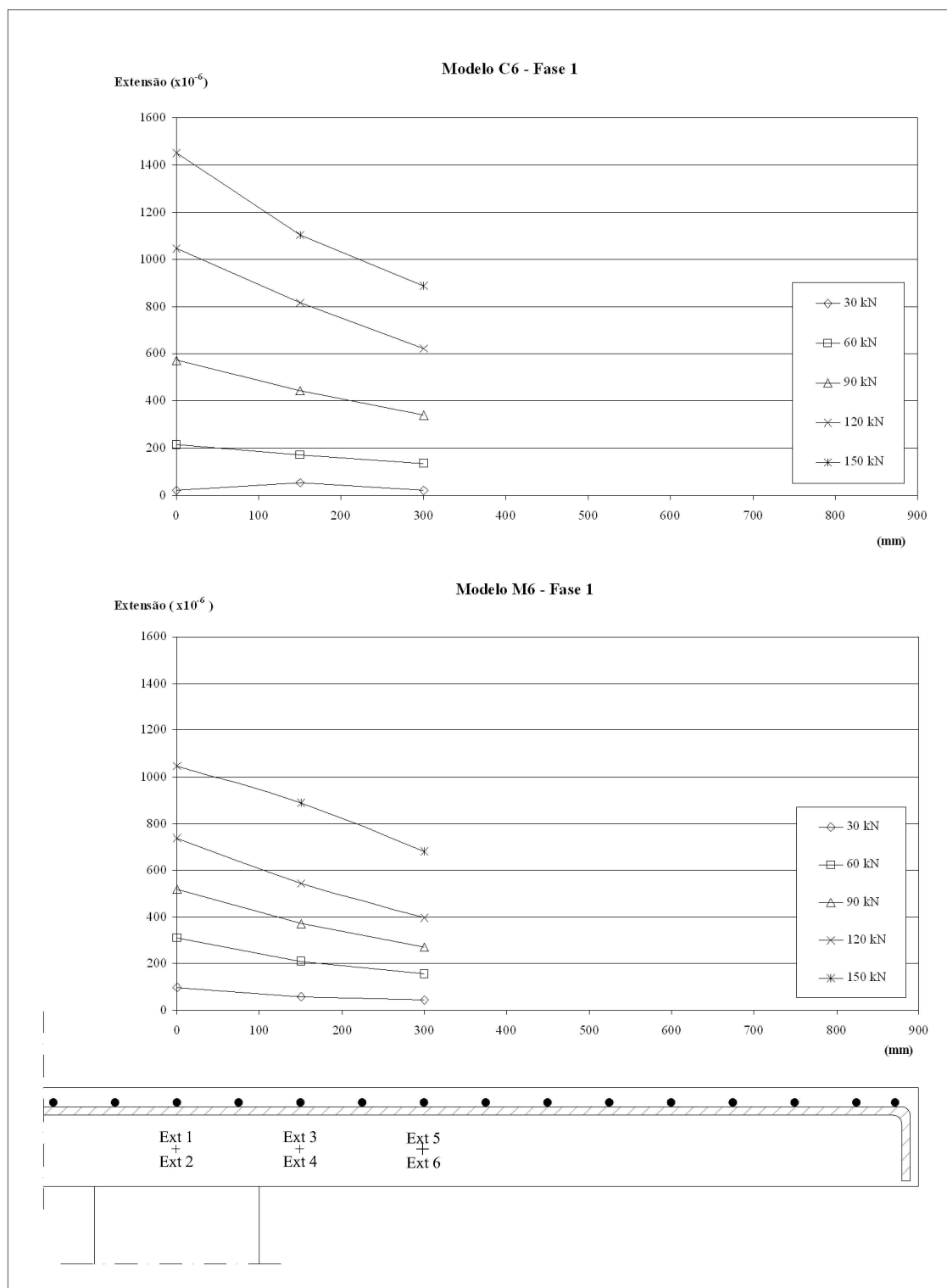


Figura 3.26 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 1 (eixo x)

Modelos C6 e M6 (Fase 2 – Rotura)

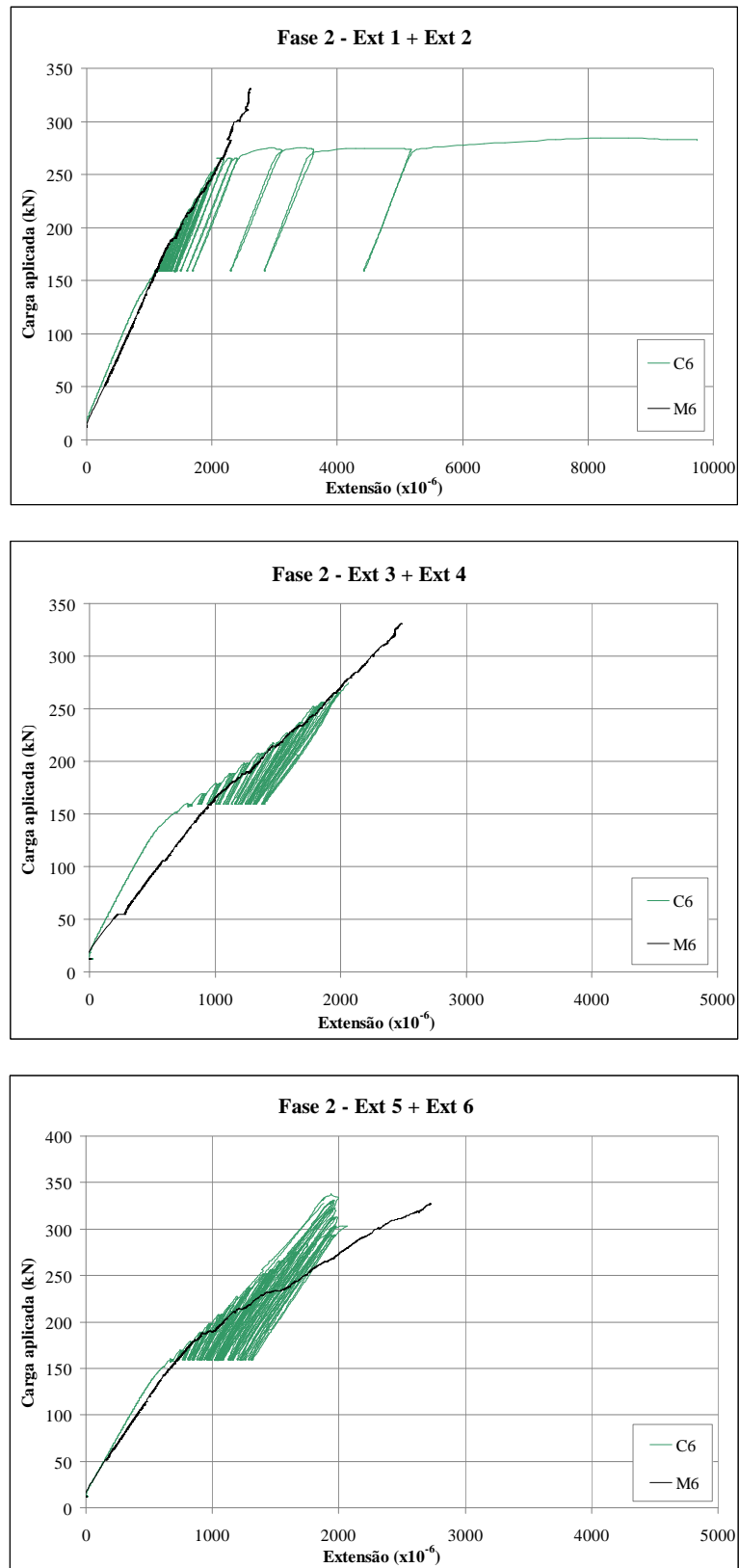


Figura 3.27 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 2 (varões na direcção y)

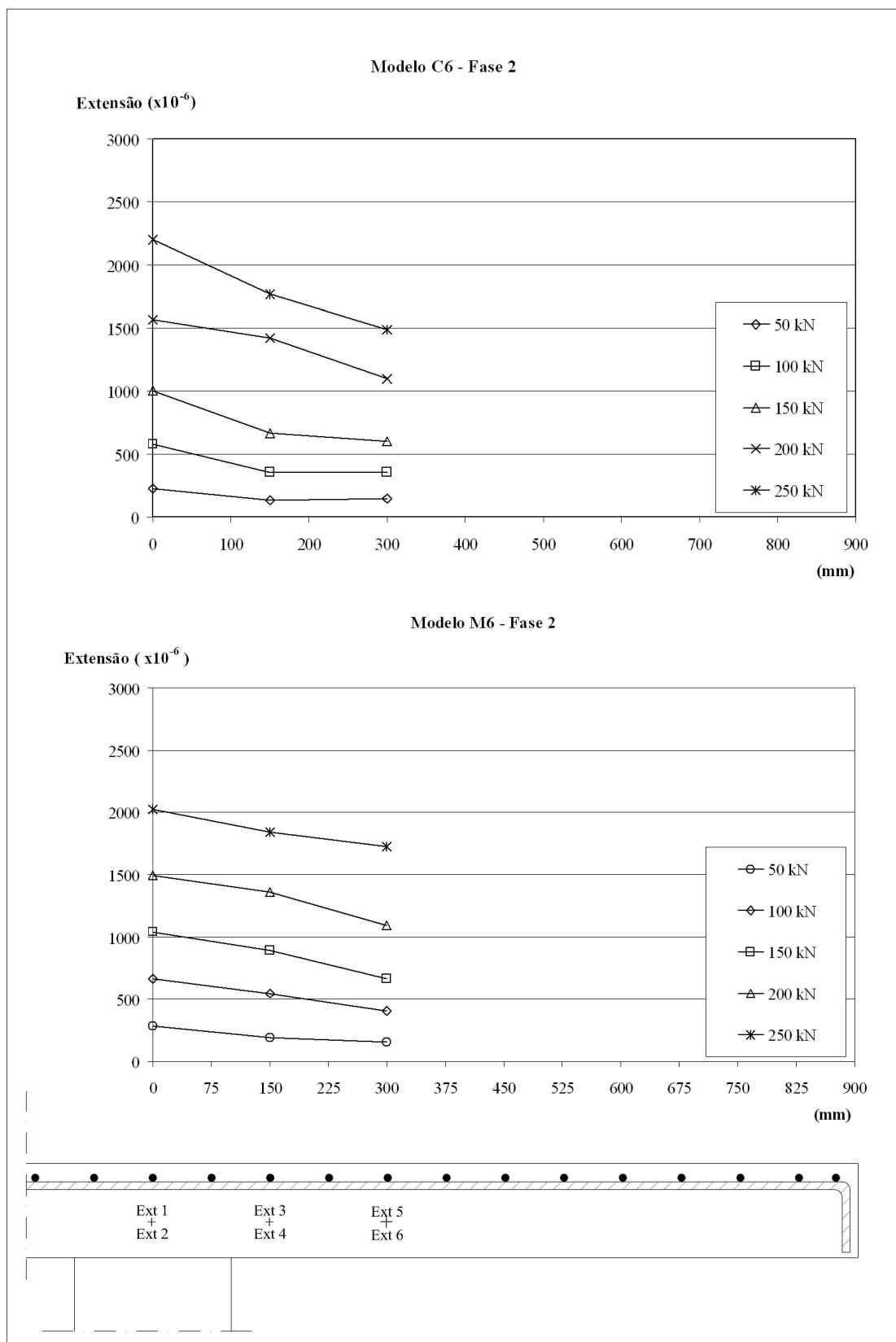


Figura 3.28 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C6 e M6 – Fase 2 (eixo x)

Modelos C8 e M8 – Fase 1 (Fendilhação)

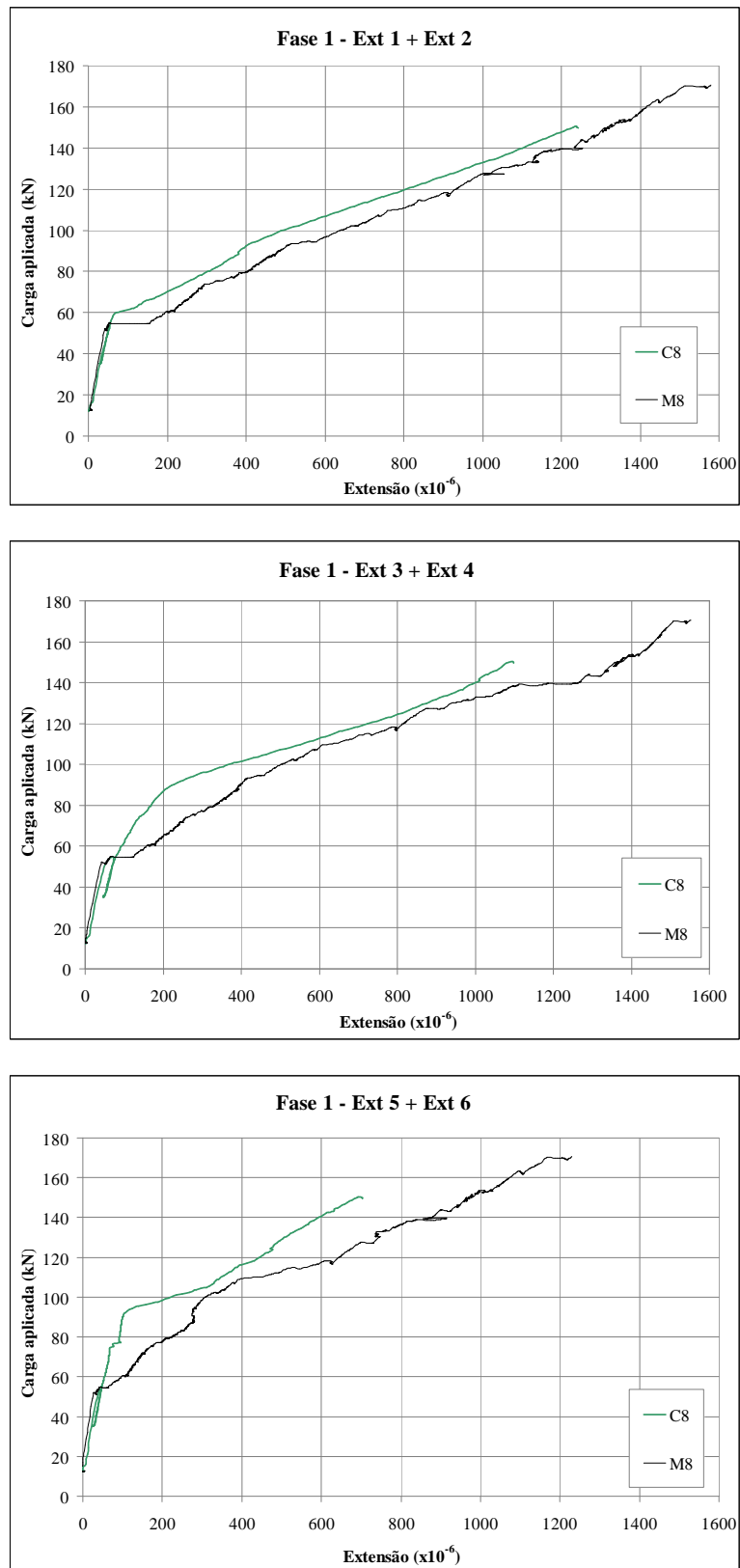


Figura 3.29 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 1
(varões na direcção y)

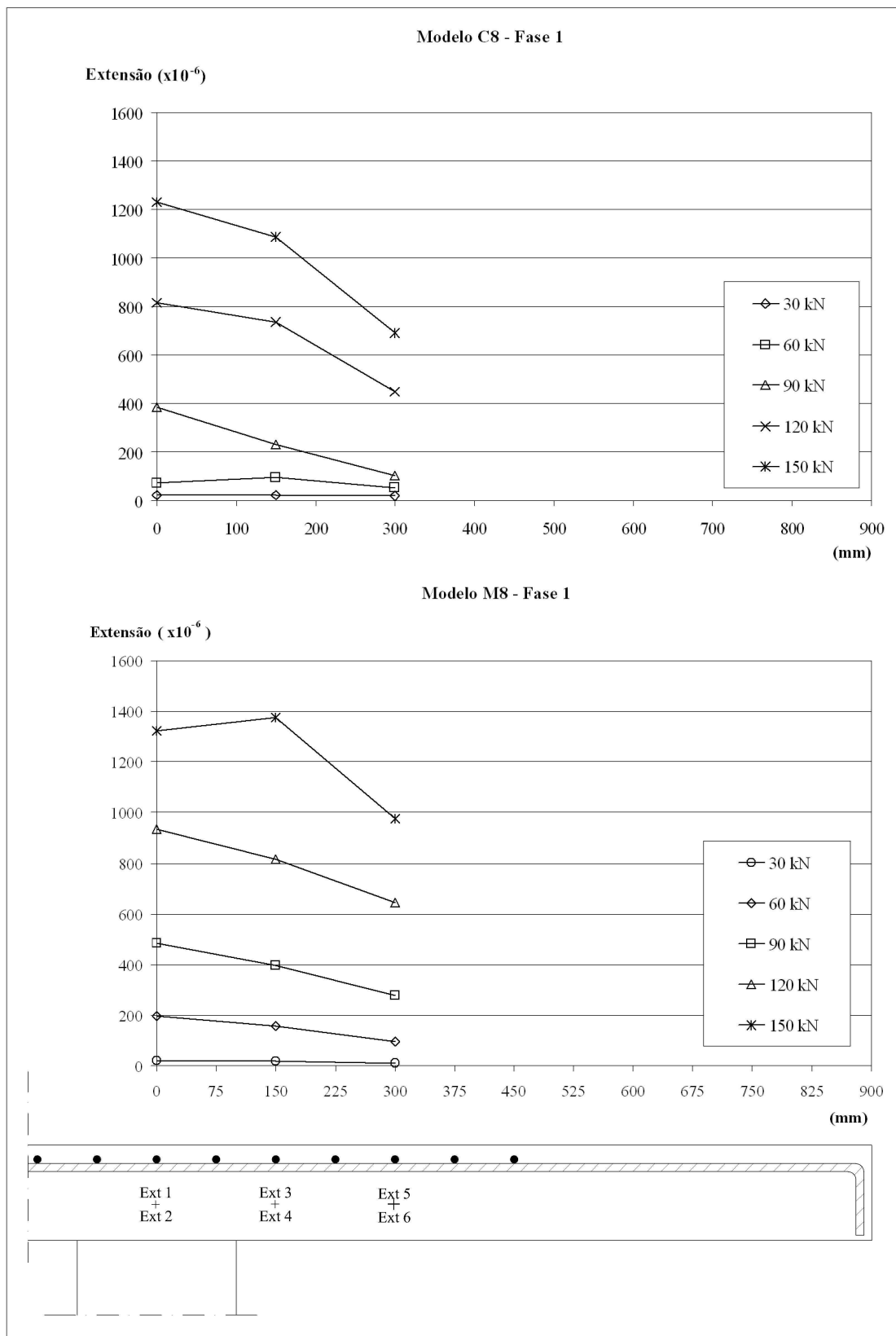


Figura 3.30 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 1 (eixo x)

Modelos C8 e M8 – Fase 2 (Rotura)

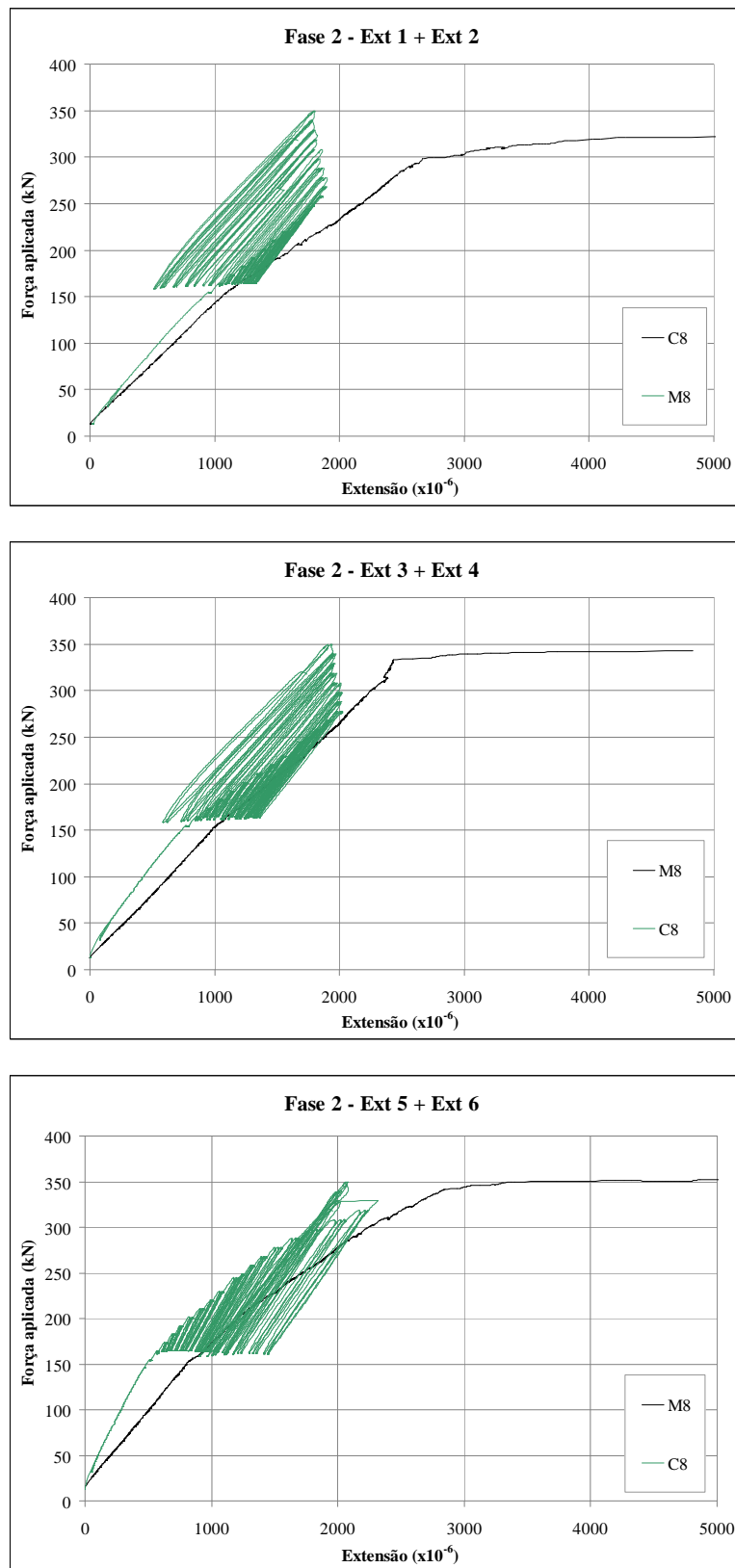


Figura 3.31 – Evolução das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 2
(varões na direcção y)

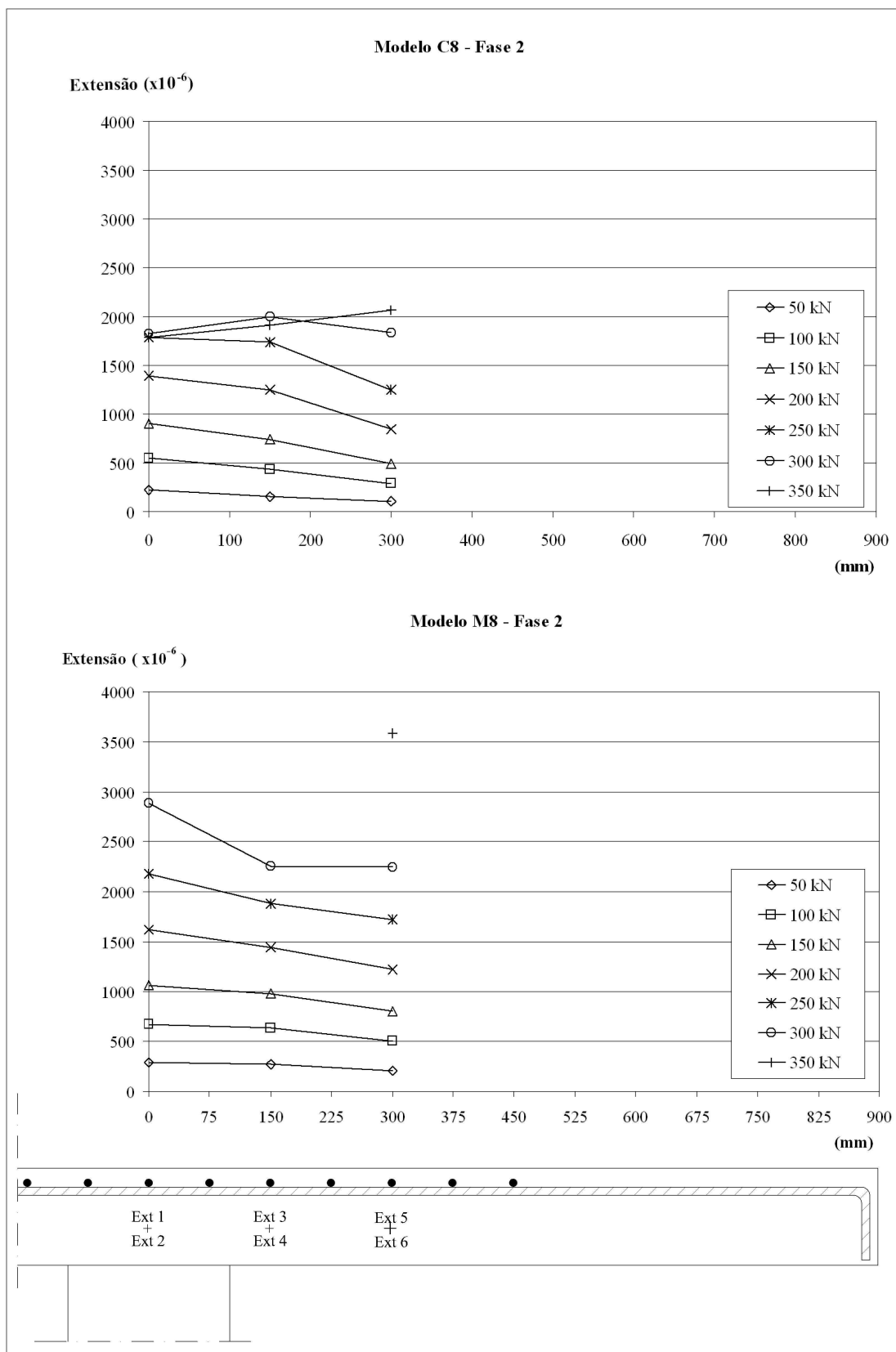


Figura 3.32 – Distribuição transversal das extensões na armadura longitudinal superior nos modelos C8 e M8 – Fase 2 (eixo x)

Considerações: Modelos C6 e M6 – Fase 1

Relativamente à fase 1, identificaram-se dois declives distintos na curva carga-extensão tanto para os ensaios cíclicos como para os ensaios monotónico. Para o modelo M6 o início da fendilhação, e consequente perda de rigidez, ocorre para uma carga vertical de cerca de 25 kN, enquanto que para o modelo C6 inicia-se sensivelmente aos 50 kN. Em ambos os ensaios, não foi observado, nesta fase, a entrada em cedência de nenhum dos varões da armadura longitudinal superior instrumentados.

Considerações: Modelos C6 e M6 – Fase 2

No modelo com comportamento monotónico (M6) as extensões variam de forma sensivelmente linear com o incremento da carga vertical. Nenhum dos varões instrumentados revelou comportamento típico de entrada em cedência.

No caso do modelo C6 o comportamento da evolução das extensões foi semelhante ao obtido no modelo M6, com excepção do varão instrumentado com o par de extensómetros 1+2, que revela comportamento de entrada em cedência, para uma carga de cerca de 260 kN. No gráfico respectivo é bem visível o comportamento não elástico deste varão, não havendo recuperação das extensões com os ciclos de carga.

Em relação à distribuição transversal de extensões nos referidos varões, esta geralmente apresenta valores máximos sobre o pilar, em ambos os modelos. A excepção é o último patamar apresentado para o modelo M6 (próximo da carga de rotura) em que a extensão é superior no varão localizado a 300 mm do centro do pilar.

Considerações: Modelos C8 e M8 – Fase 1

Nestes modelos verificou-se novamente, na fase 1, dois patamares distintos da evolução da extensão com a carga vertical, variando apenas os valores do início da fendilhação dos modelos como é visível na Figura 3.29. Este início é, para o modelo M8, aos 55 kN de carga vertical e para o modelo C8 é aproximadamente aos 60 kN.

Nesta fase não foi observada a entrada em cedência de nenhum dos varões da armadura longitudinal superior, em ambos os modelos.

Considerações: Modelos C8 e M8 – Fase 2

Nos patamares iniciais de carregamento as extensões variam de forma sensivelmente linear com a carga vertical, tanto no modelo sujeito a carregamento monotónico como no sujeito à carga cíclica.

No modelo C8 não se verificou a entrada em cedência de nenhum dos varões instrumentados. No ensaio M8 os varões instrumentados apresentam um comportamento típico de entrada em cedência, com grandes variações dos valores da extensão para pequenos incrementos de carga. Este fenómeno faz-se notar para um valor de carga vertical aplicada de cerca de 300 kN.

Em geral, e para os patamares de carga apresentados, a distribuição transversal de extensões apresenta valores máximos sobre o pilar. A excepção é o ultimo patamar apresentado para o modelo C8, já próximo da rotura por punçoamento, em que a forte fendilhação existente provoca algumas perturbações no andamento transversal das extensões, no varão mais próximo do pilar. Os varões mais afastados do pilar apresentam igualmente um comportamento monotónico, em que as extensões aumentam à medida que a carga aumenta, sem aparentemente serem tão afectados pela fendilhação.

Observações gerais

O Quadro 3.7 apresenta as extensões médias obtidas nos varões da armadura longitudinal superior instrumentados para dois patamares de carga vertical aplicada. Estas extensões são a média dos valores obtidos nos três varões instrumentados.

Quadro 3.7 – Extensões médias na armadura longitudinal superior em 2 patamares de carga

Modelo	Parafuso de reforço	Força inicial dos parafusos (kN)	V_{exp} (kN)	$V = 200$ kN $\epsilon_{méd}$ (%)	$V = 250$ kN $\epsilon_{méd}$ (%)
R	-	-	269	1.5	2.0
M6	M6	3.3	331	1.3	1.9
M8	M8	5.9	381	1.4	1.9
C6	M6	4.3	337	1.4	1.8
C8	M8	4.6	349	1.2	1.6

Da análise do Quadro 3.7, observa-se que a introdução dos parafusos de reforço originou uma ligeira diminuição das extensões médias da armadura longitudinal.

No caso dos modelos reforçados com parafusos M6, verifica-se que a diminuição é um pouco menos significativa no modelo C6.

A alteração do sistema de carregamento não originou diferenças significativas nesta grandeza. De facto, não se registou uma tendência clara, havendo exemplo em que nos modelos sujeitos a carregamento cíclico as extensões médias nas armaduras longitudinais

superiores foram maiores que no modelo homólogo com carregamento monotónico, e outros em que se registou o inverso.

As distribuições transversais de extensões são, em geral, as expectáveis, com valores mais elevados para os varões junto ao pilar, em correspondência com os maiores momentos aí existentes.

3.7.2 Deslocamentos verticais

Com os resultados provenientes dos deflectómetros instalados, construíram-se três tipos de gráficos:

- Para os modelos ensaiados com o mesmo tipo de parafusos de reforço, foram elaborados gráficos do deslocamento em função da carga aplicada;
- Para cada modelo ensaiado foi elaborada a deformada para certos patamares de carga;
- Para os modelos ensaiados com o mesmo tipo de parafusos de reforço e em comparação com o modelo de referência, foi construído um gráfico do deslocamento em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura do respectivo modelo.

Para uma comparação mais simples e directa entre os ensaios cíclicos e monotónicos, foi feita a média entre os resultados obtidos de deflectómetros diametralmente opostos em relação ao centro do modelo. Assim sendo, para os dois modelos, são apresentados os gráficos de evolução do deslocamento vertical a 0.75 m (média dos deflectómetros 1 e 5) e a 0.30 m (média dos deflectómetros 2 e 4) do centro, em função da carga aplicada.

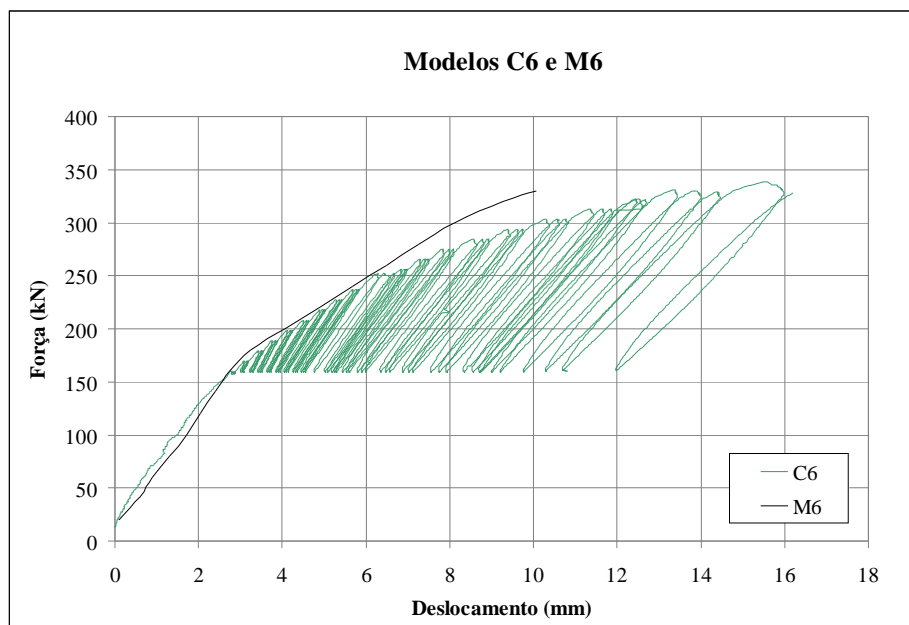


Figura 3.33 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C6 e M6 a uma distância de 0.75 m do centro

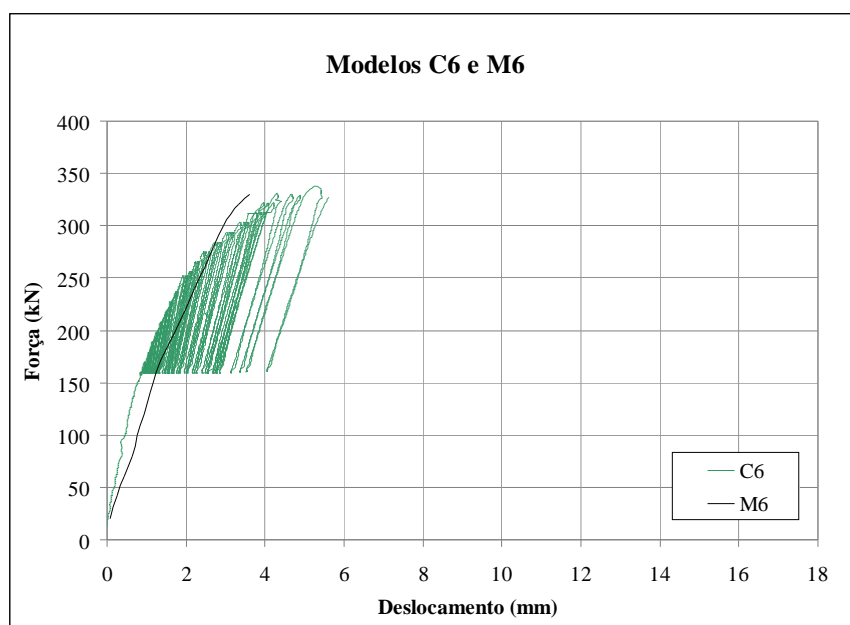


Figura 3.34 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C6 e M6 a uma distância de 0.30 m do centro

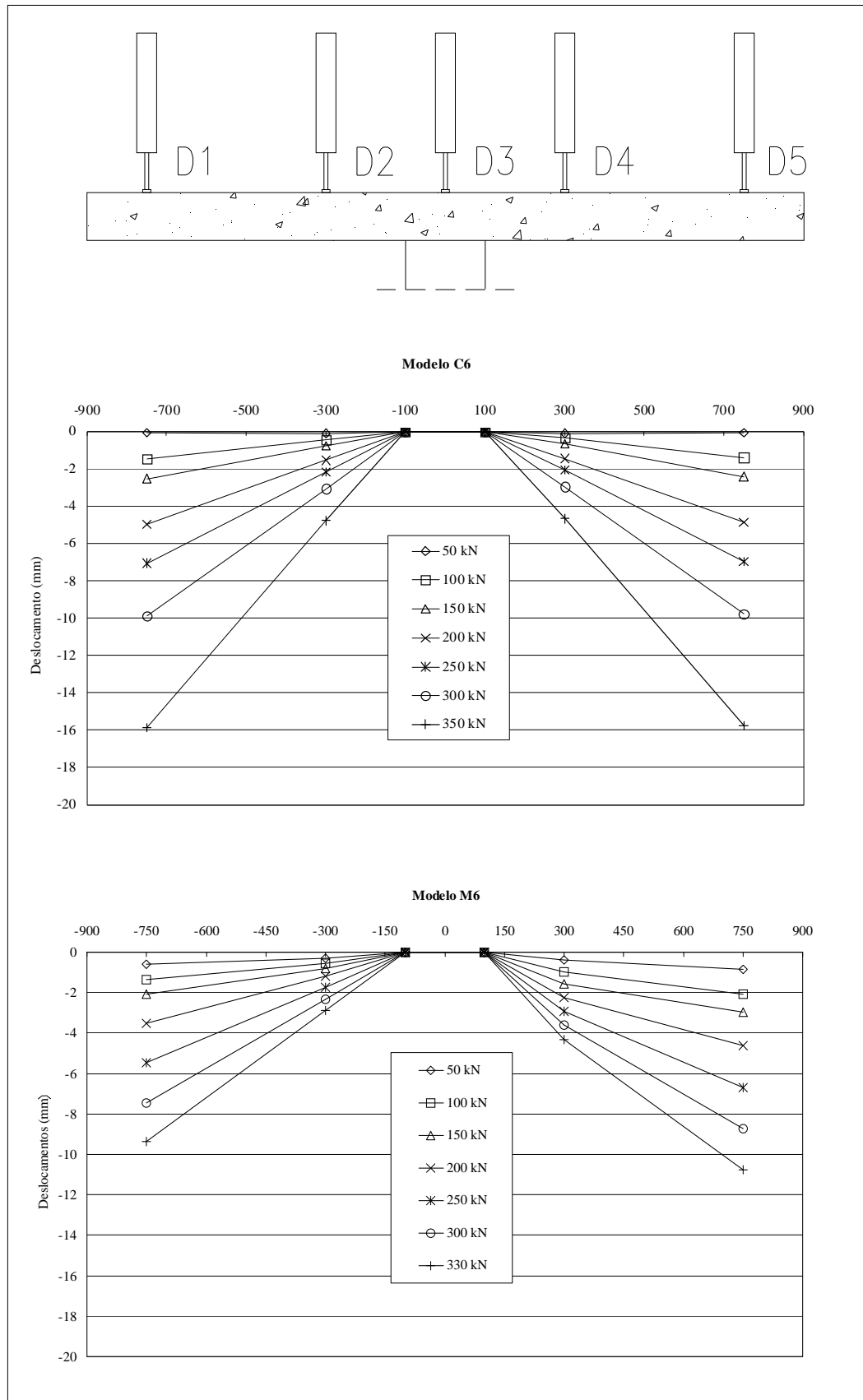


Figura 3.35 – Deformada na direcção x para vários patamares de carga (modelos C6 e M6)

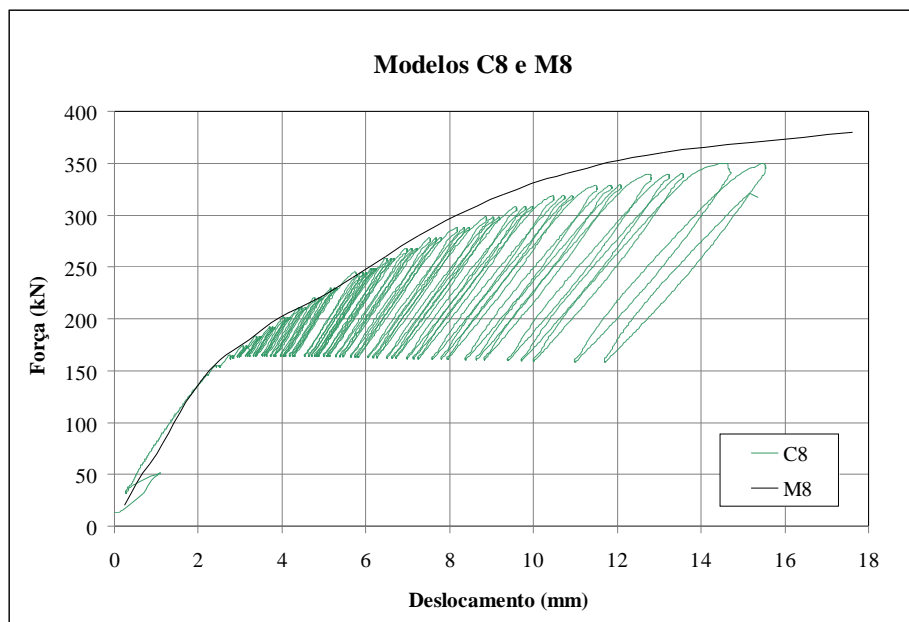


Figura 3.36 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C8 e M8 a uma distância de 0.75 m do centro

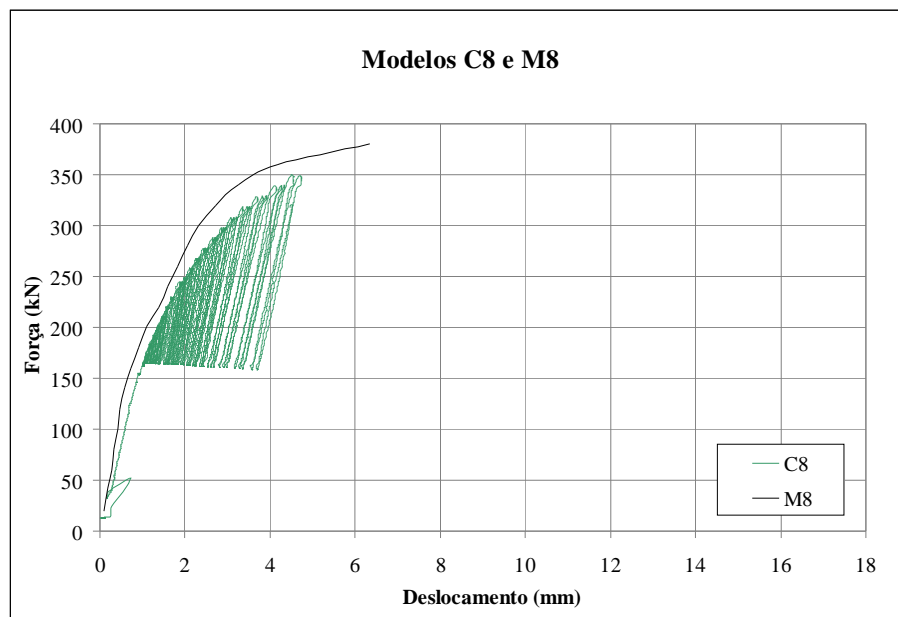


Figura 3.37 – Evolução dos deslocamentos verticais com a carga vertical aplicada nos modelos C8 e M8 a uma distância de 0.30 m do centro

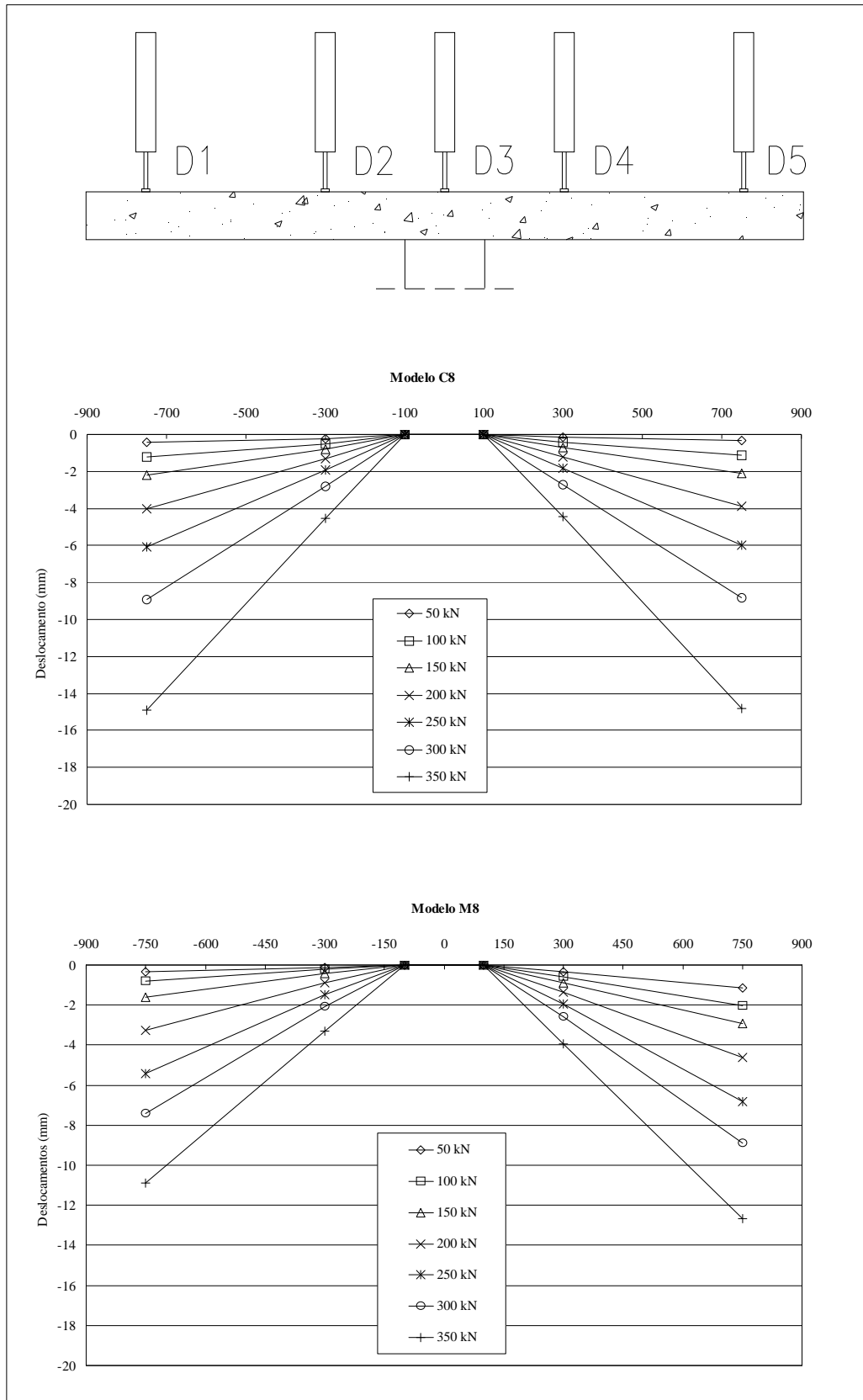


Figura 3.38 – Deformada na direcção x para vários patamares de carga (modelos C8 e M8)

Nas Figuras 3.39 e 3.40 apresentam-se os gráficos de deslocamento máximo em função da relação entre a carga aplicada e a carga de rotura, para os modelos reforçados como o mesmo tipo de reforço e em comparação com o modelo de referência.

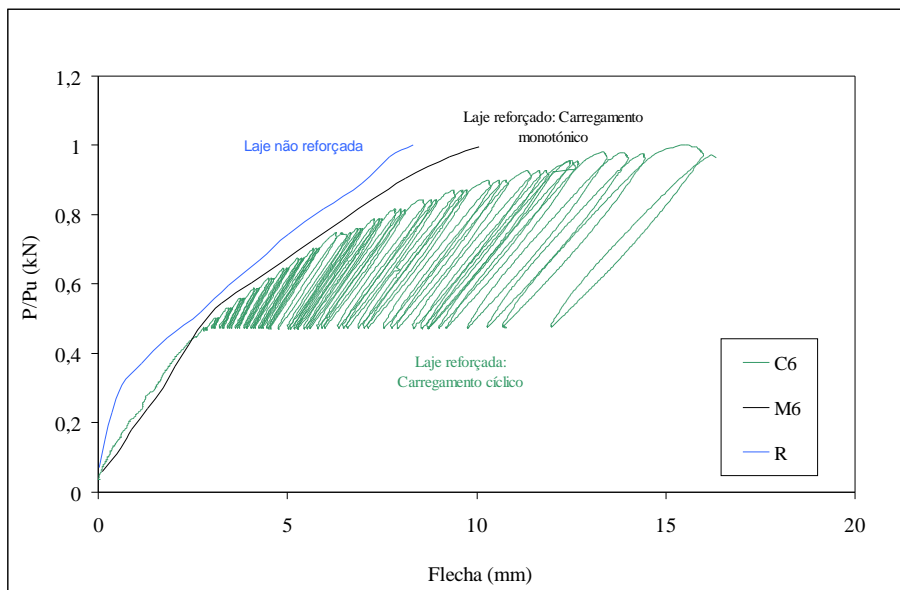


Figura 3.39 – Flecha dos modelos R, C6 e M6

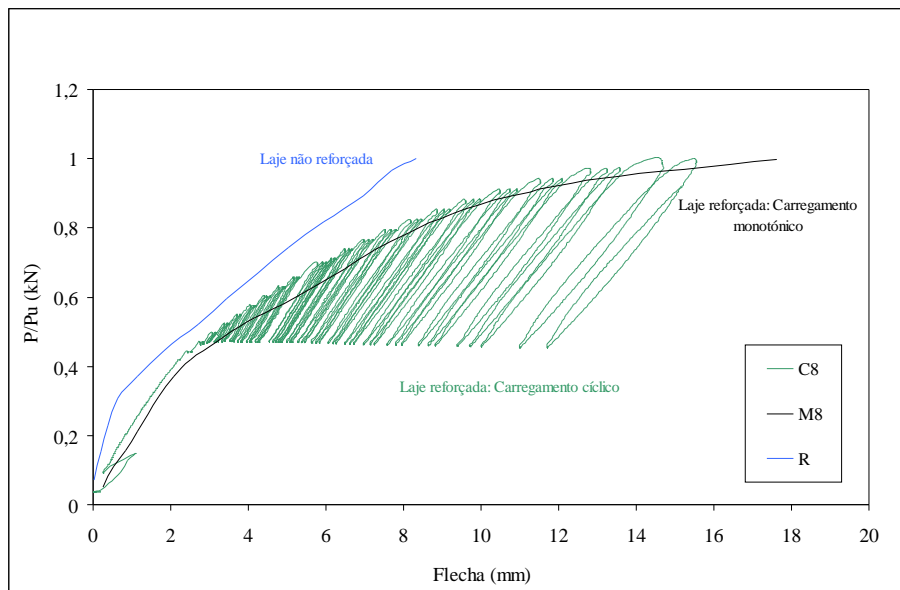


Figura 3.40 – Flecha dos modelos R, C8 e M8

Observações finais

Pode-se observar nas deformadas apresentadas (Figuras 3.35 e 3.38) que as rotações concentram-se sobretudo junto ao pilar, produzindo deformações plásticas, originadas pela forte fendilhação tangencial nesta zona. À medida que nos afastamos do centro, a deformada tem um comportamento sensivelmente linear. Como é visível, a deformação dos modelos pode ser comparada à deformação de um corpo rígido em torno de um eixo, que neste caso é sensivelmente o eixo do pilar.

No quadro seguinte apresentam-se os deslocamentos verticais máximos registados na direcção x (média dos valores registados nos deflectómetros 1 e 5) para uma carga vertical de 200 kN e 250 kN.

Quadro 3.8 – Deslocamentos em 2 patamares de carga

Modelo	Parafuso de reforço	Força inicial dos parafusos (kN)	V_{exp} (kN)	$V = 200$ kN desl. (mm)	$V = 250$ kN desl. (mm)
R	-	-	269	5.0	7.3
M6	M6	3.3	331	4.1	6.1
M8	M8	5.9	381	3.9	6.1
C6	M6	4.3	337	4.9	7.0
C8	M8	4.6	349	3.9	6.0

Comparando o modelo de referência com os restantes pode-se verificar que a aplicação dos parafusos verticais de reforço tem como consequência uma diminuição dos deslocamentos verticais nas extremidades dos modelos, tanto nos modelos com carregamento cíclicos como nos modelos com carregamento monotónico. A introdução dos parafusos de reforço aumenta assim a rigidez dos modelos.

Em geral, e para o mesmo nível de carga, a deformação com os modelos ensaiados com carregamento cíclico foi superior. Isto revela que este tipo de carregamento degrada a rigidez da laje, apesar de terem sido utilizados um número de ciclos não muito elevado.

O aumento do diâmetro dos parafusos de reforço originou um incremento de rigidez da laje, tendo-se observado valores inferiores dos deslocamentos nos modelos reforçados com parafusos M8 (modelos M8 e C8) quando comparados com os obtidos nos modelos em que o reforço foi conseguido com a utilização de parafusos M6 (modelos M6 e C6). As flechas na rotura nos modelos reforçados foram superiores às registadas no modelo de referência.

3.7.3 Evolução da força nos parafusos de reforço

No decorrer dos ensaios foram registadas as leituras das extensões dos 8 parafusos instrumentados (P1 a P4 e P9 a P12) através dos 16 extensómetros (dois por parafuso). Na figura 3.41 estão localizados e identificados em planta os parafusos instrumentados.

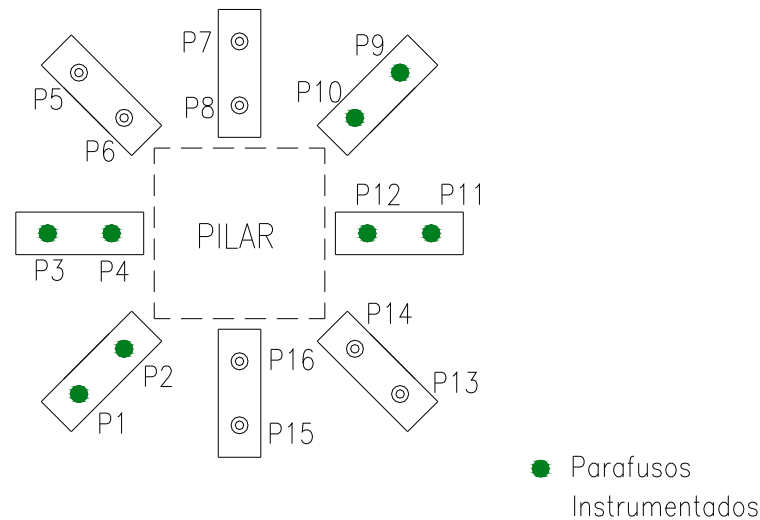


Figura 3.41 – Planta dos parafusos instrumentados

Em função das extensões foi possível determinar a força nos parafusos ao longo do ensaio. Este cálculo foi feito através de expressões baseadas nos gráficos de caracterização do aço dos parafusos de reforço, ou seja, para cada tipo de parafuso, elaborou-se um gráfico da extensão em função da força aplicada (ver ponto 3.4) e aproximaram-se os segmentos do gráfico a rectas cujas expressões permitiram calcular a força nos parafusos através da extensão.

Modelos C6 e M6

Após as operações de reforço, o aspecto das faces inferior e superior do modelo C6 é o observado na Figura 3.42.

Os extensómetros do parafuso 2 do modelo M6 ficaram danificados pelo que não foi possível recolher os dados relativos a este parafuso.



Figura 3.42 – Face inferior e superior do modelo C6 após o reforço

Apresentam-se, nas figuras seguintes, os gráficos dos resultados experimentais das forças nos parafusos instrumentados em função da carga aplicada, para os dois tipos de carregamento.

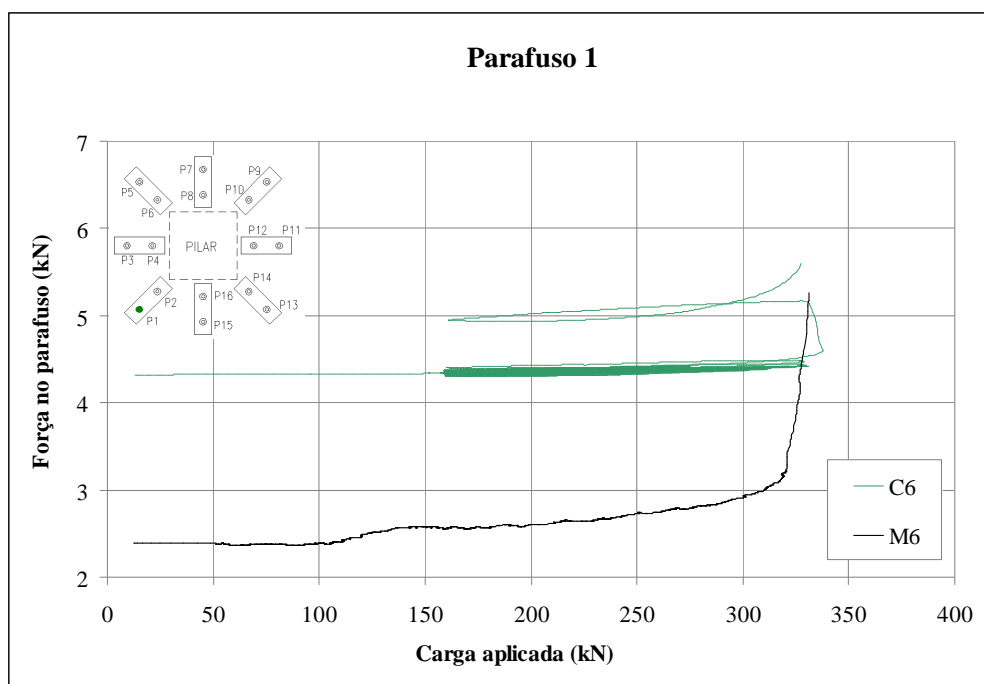


Figura 3.43 – Evolução da força no parafuso 1 dos modelos C6 e M6

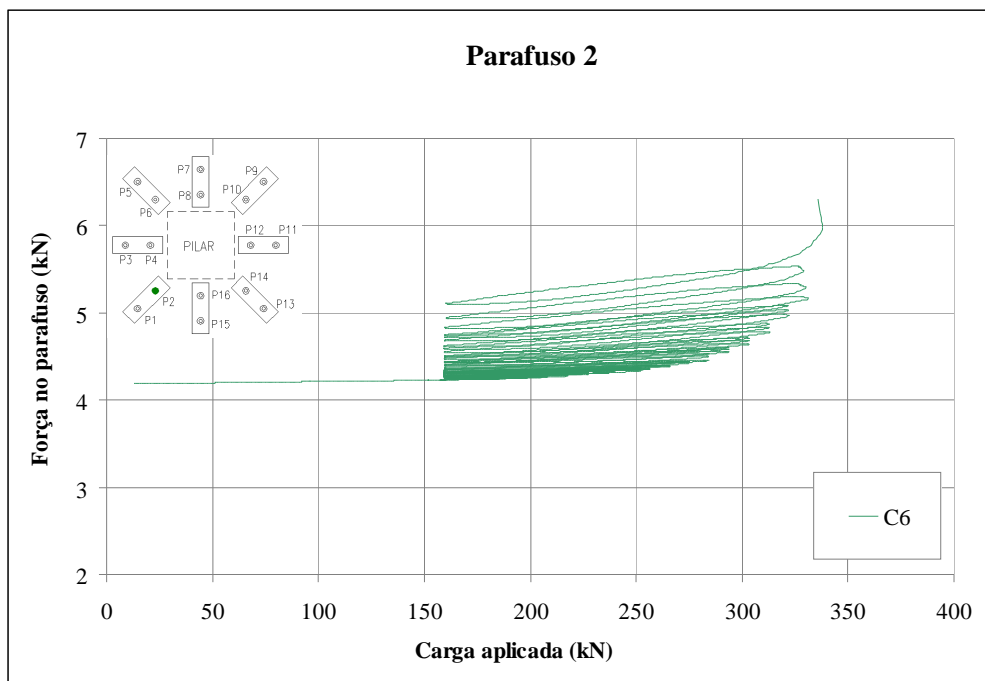


Figura 3.44 – Evolução da força no parafuso 2 dos modelos C6

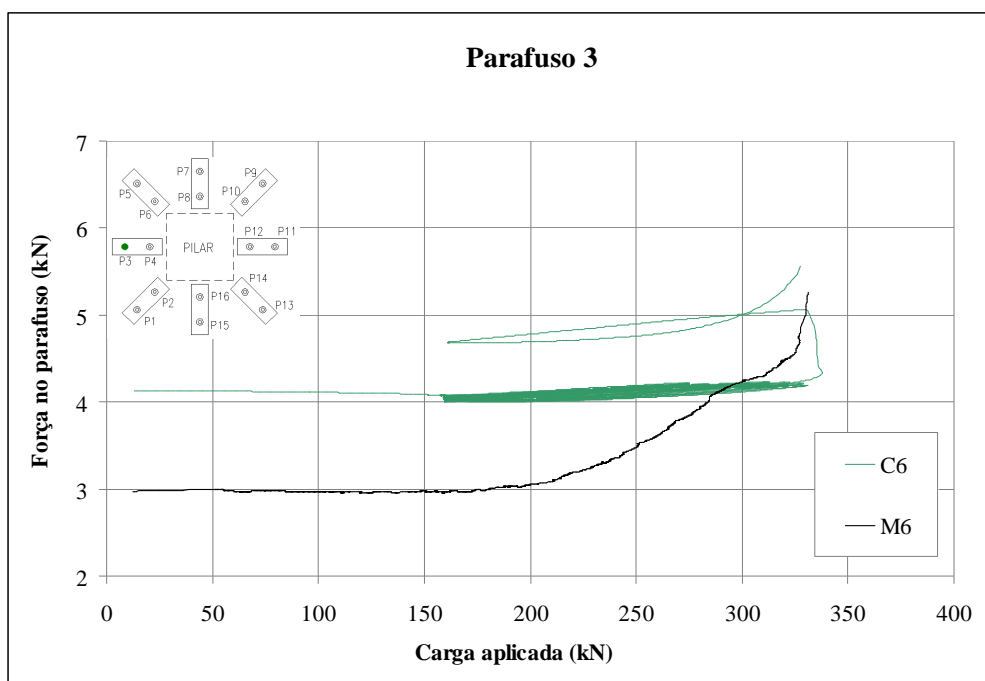


Figura 3.45 – Evolução da força no parafuso 3 dos modelos C6 e M6

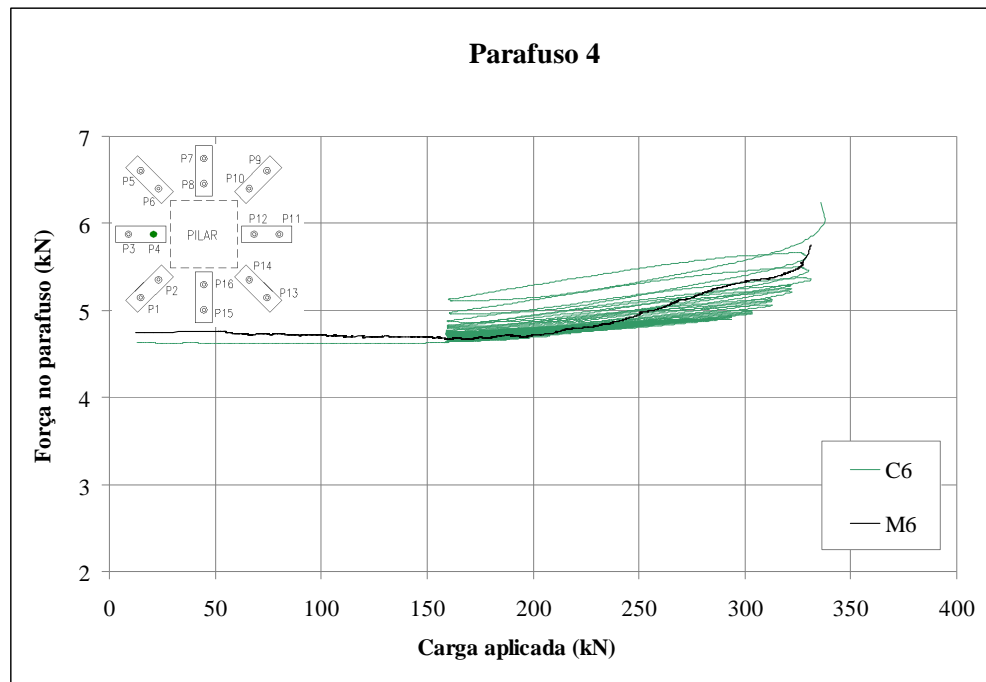


Figura 3.46 – Evolução da força no parafuso 4 dos modelos C6 e M6

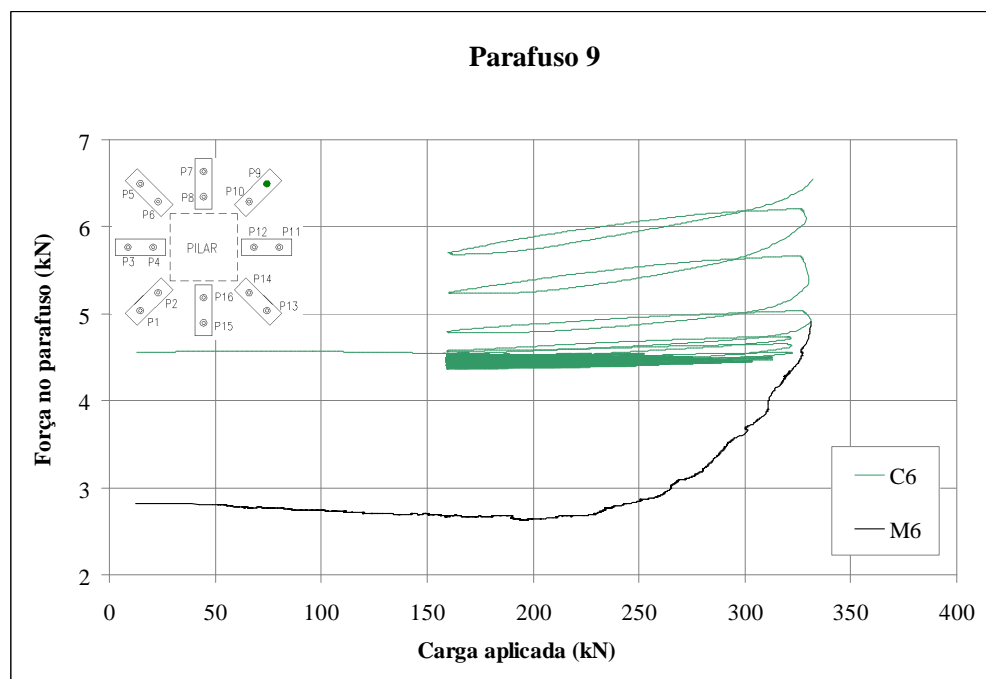


Figura 3.47 – Evolução da força no parafuso 9 dos modelos C6 e M6

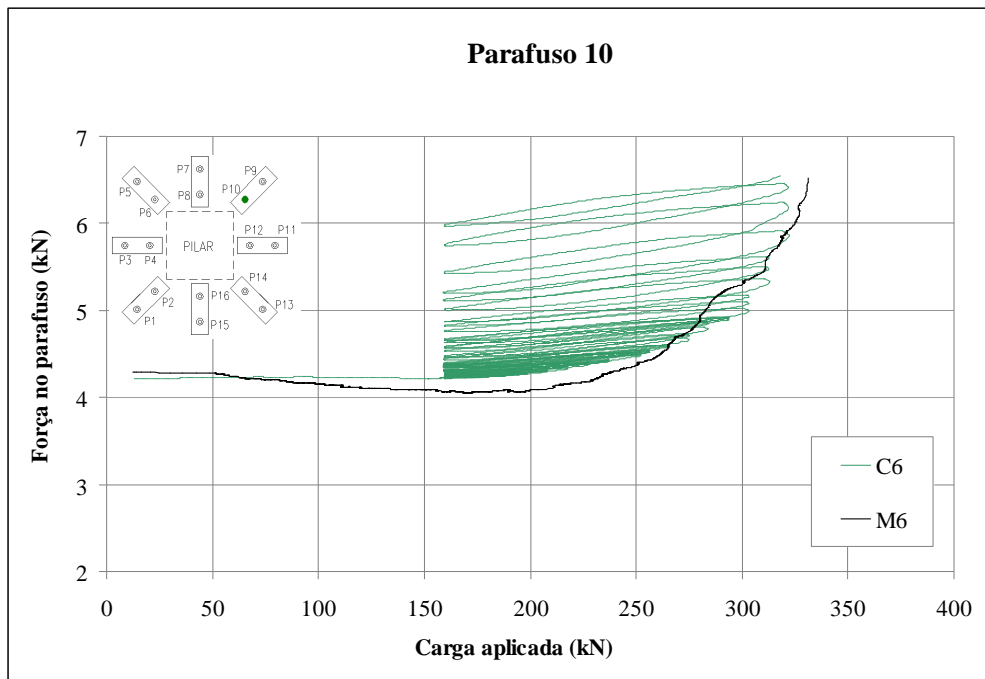


Figura 3.48 – Evolução da força no parafuso 10 dos modelos C6 e M6

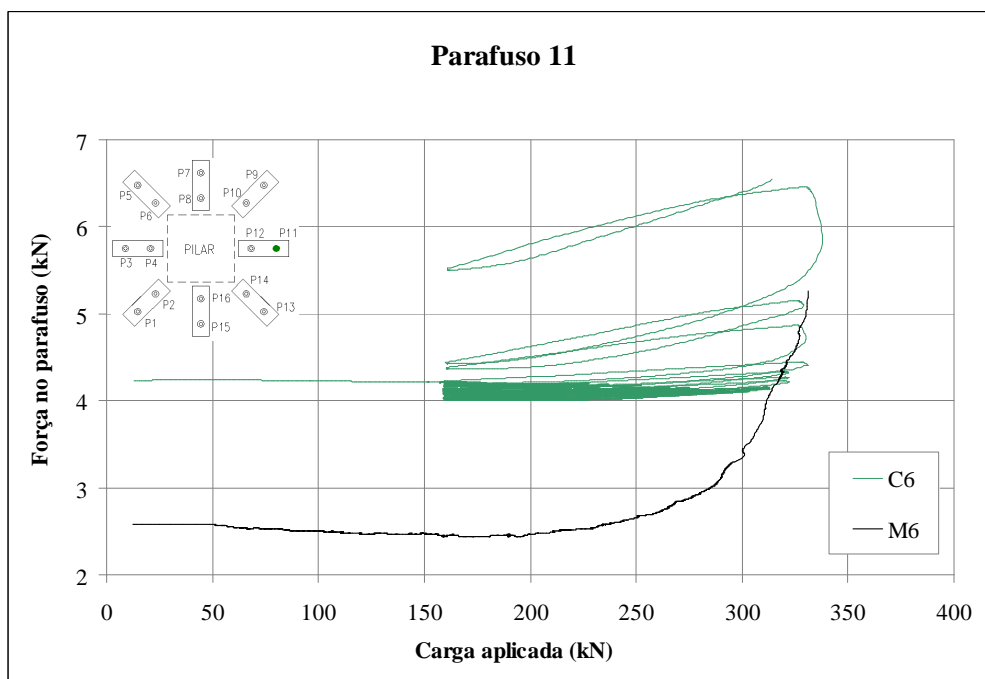


Figura 3.49 – Evolução da força no parafuso 11 dos modelos C6 e M6

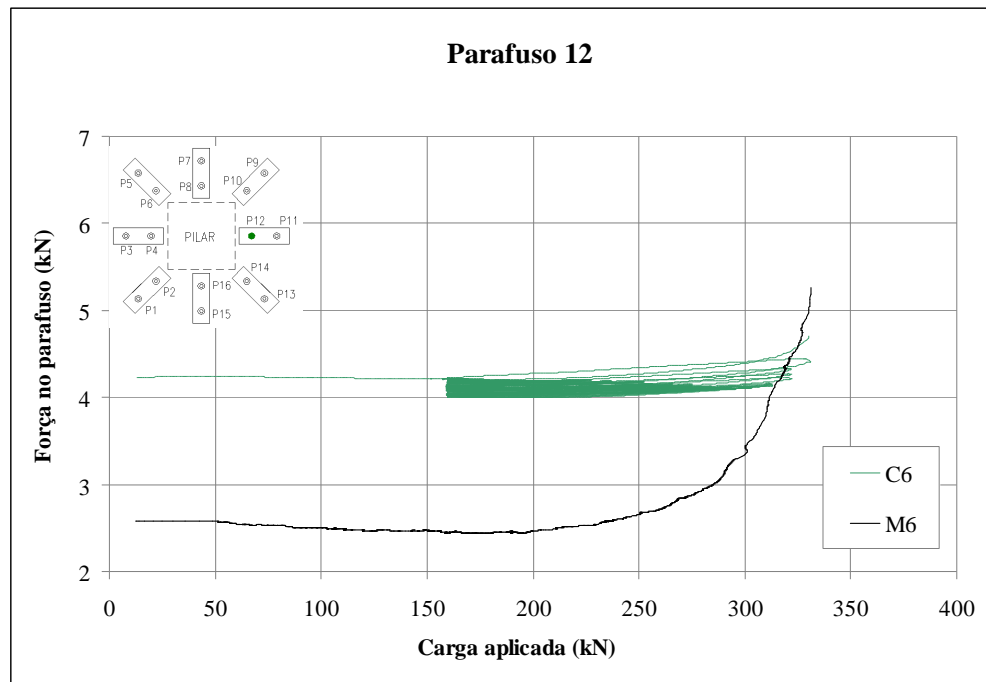


Figura 3.50 – Evolução da força no parafuso 12 dos modelos C6 e M6

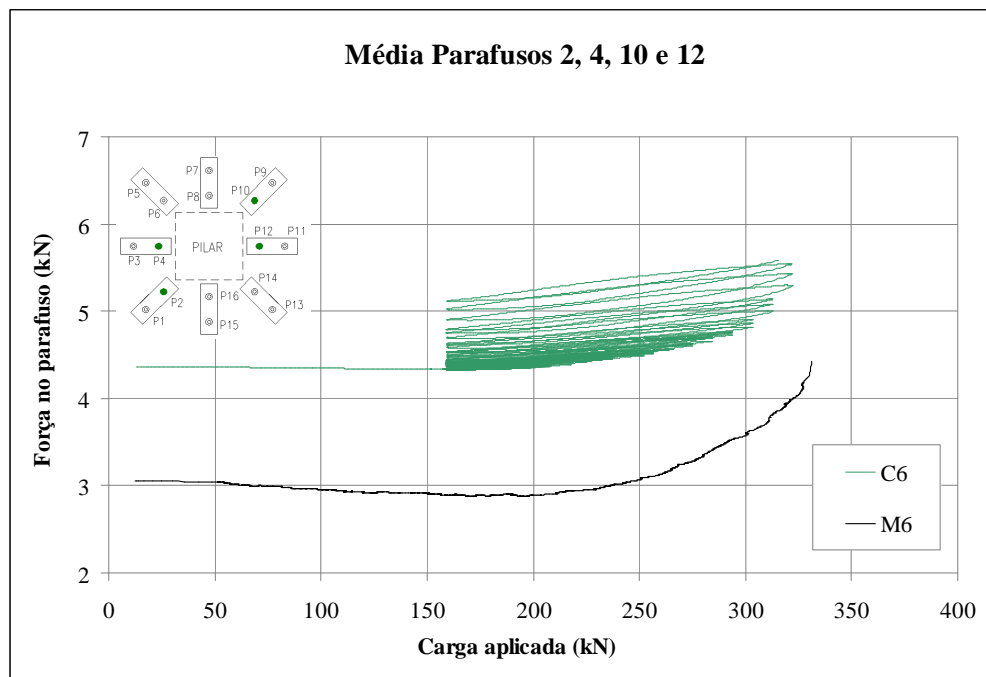


Figura 3.51 – Evolução da força média nos parafusos interiores (2, 4, 10 e 12) dos modelos C6 e M6

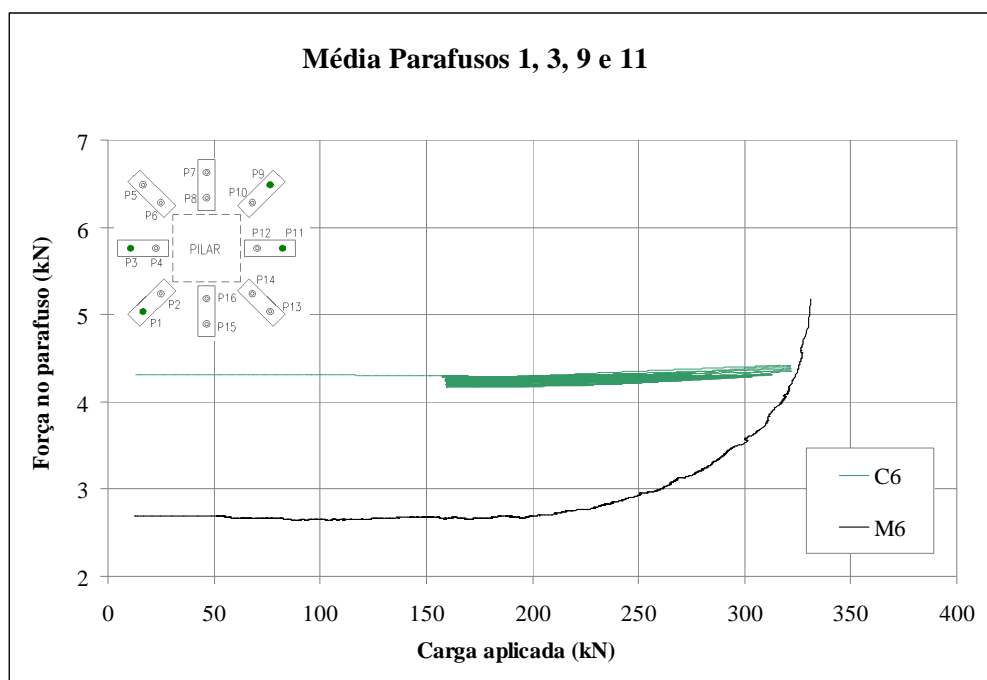


Figura 3.52 – Evolução da força média nos parafusos exteriores (1, 3, 9 e 11) dos modelos C6 e M6

No quadro seguinte faz-se um resumo das forças iniciais e finais de todos os parafusos instrumentados, dos modelos M6 e C6.

Quadro 3.9 – Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M6 e C6

Parafuso		Modelo M6			Modelo C6		
		F_i (kN)	F_f (kN)	Variação	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação
Exteriores	1	2.4	5.3	2.9	4.3	5.6	1.3
	3	3.0	5.3	2.3	4.1	5.6	1.5
	9	2.8	4.9	2.1	4.6	6.5	1.9
	11	2.6	5.3	2.7	4.2	6.5	2.3
	Média	2.7	5.2	2.5	4.3	6.1	1.8
Interiores	2	-	-	-	4.2	6.3	2.1
	4	4.7	5.7	1.0	4.6	6.2	1.6
	10	4.3	6.5	2.1	4.2	6.5	2.3
	12	3.1	5.3	2.2	4.4	6.5	2.1
	Média	4.0	5.8	1.8	4.4	6.4	2.0

Em ambos os modelos, e na fase inicial do carregamento, a força instalada nos parafusos manteve-se praticamente constante. A partir do valor de carga vertical aplicada de cerca de 200 kN verifica-se um incremento acentuado de força nos mesmos, denotando uma maior solicitação dos parafusos de reforço.

Os parafusos colocados na camada interior (pares) apresentam uma força superior à dos parafusos da camada mais exterior (ímpares). A força final (determinada no patamar de carga que antecede a rotura) é ligeiramente superior no modelo C6, fruto provavelmente do facto de a força inicialmente instalada nos parafusos de reforço deste modelo, ser igualmente maior do que os do modelo M6.

Modelos C8 e M8

Na seguinte figura apresenta-se o aspecto final das faces inferior e superior do modelo C8 após as operações de reforço.



Figura 3.53 – Face inferior e superior do modelo C8 após o reforço.

Apresentam-se novamente, nas figuras seguintes, os gráficos dos resultados experimentais das forças nos parafusos instrumentados em função da carga aplicada, para os dois tipos de carregamento. De salientar que os extensómetros do parafuso 12 foram danificados na preparação dos ensaios, em ambos os modelos, não se apresentando resultados para este parafuso.

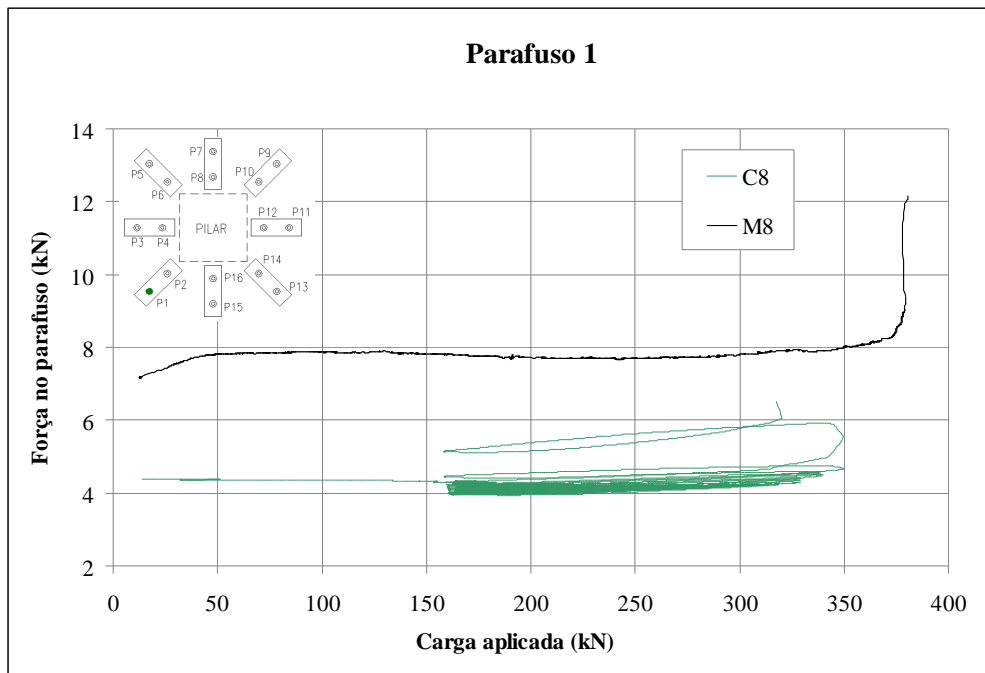


Figura 3.54 – Evolução da força no parafuso 1 dos modelos C8 e M8

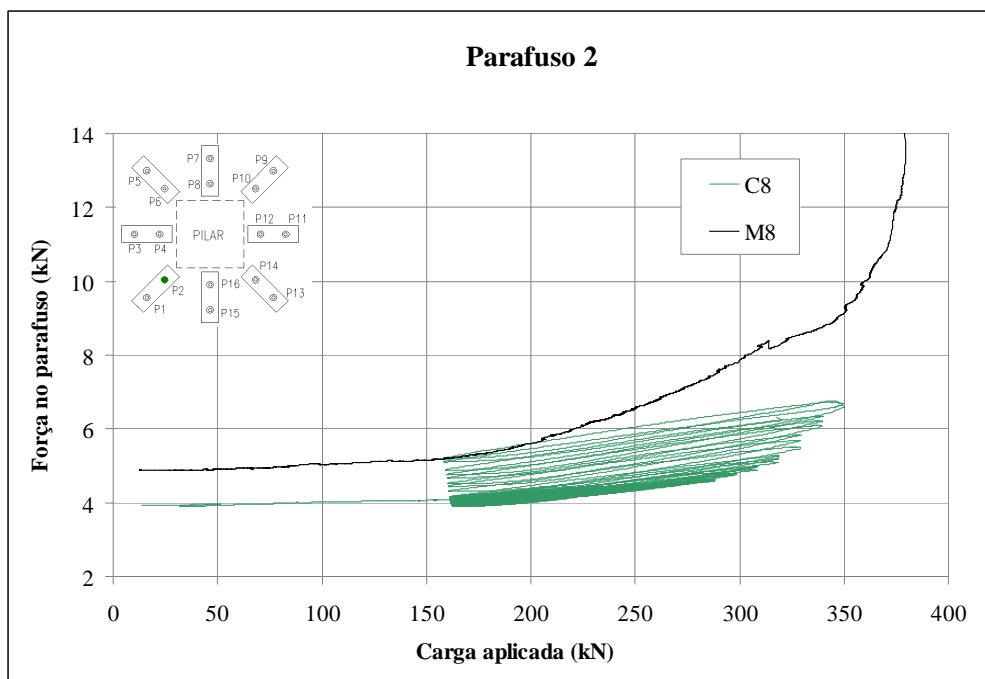


Figura 3.55 – Evolução da força no parafuso 2 dos modelos C8 e M8

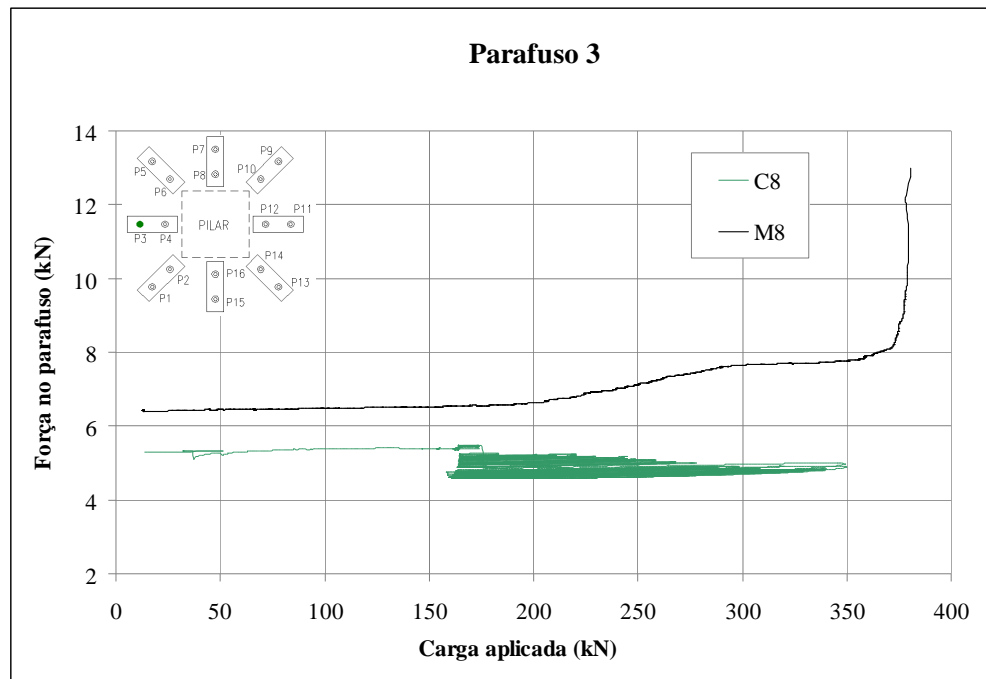


Figura 3.56 – Evolução da força no parafuso 3 dos modelos C8 e M8

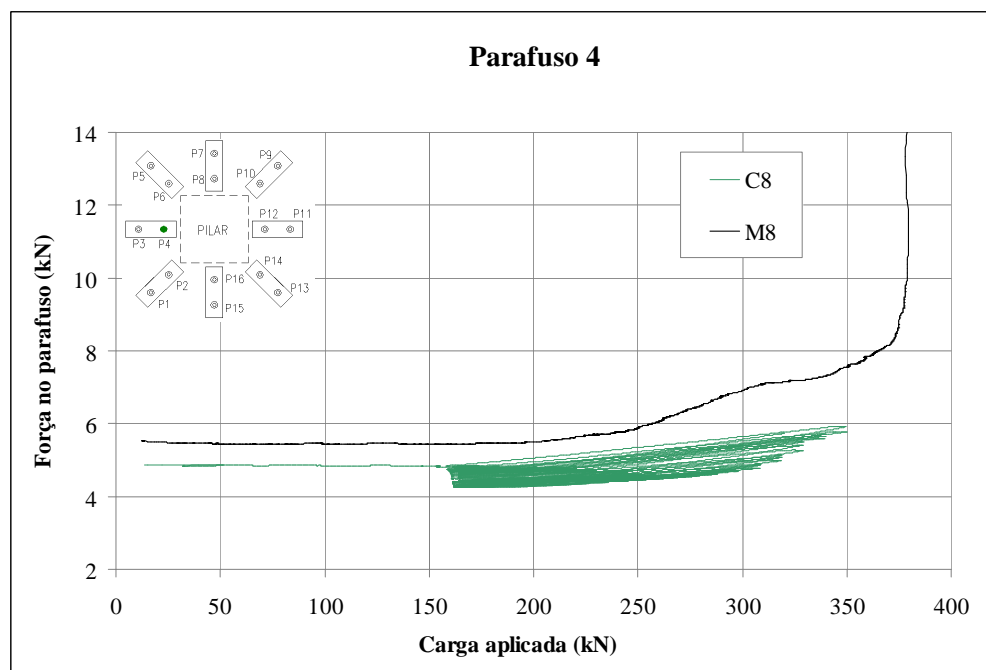


Figura 3.57 – Evolução da força no parafuso 4 dos modelos C8 e M8

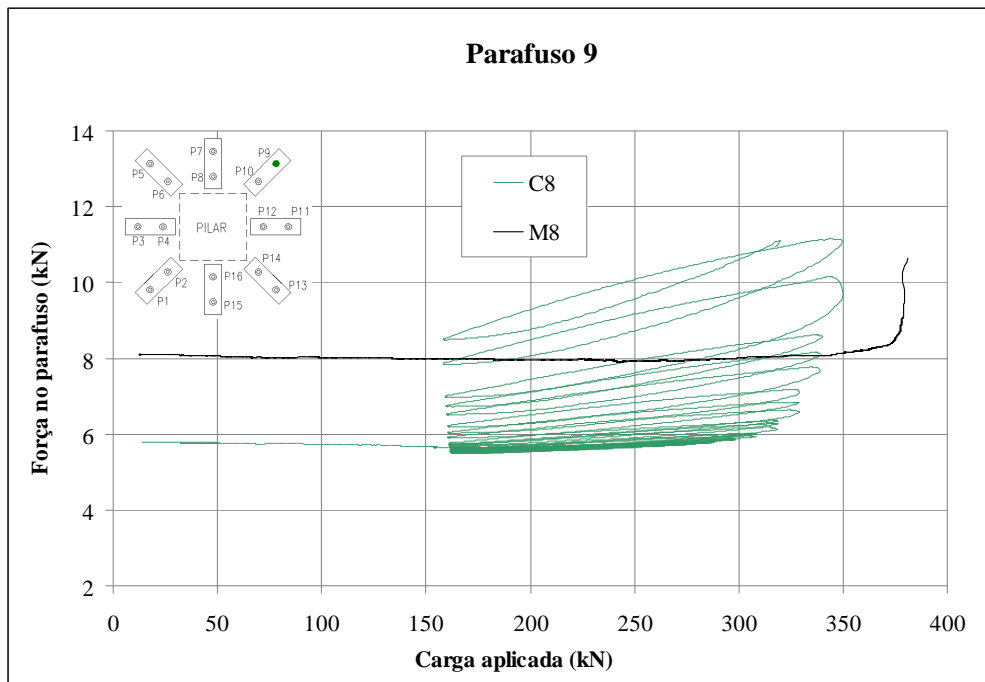


Figura 3.58 – Evolução da força no parafuso 9 dos modelos C8 e M8

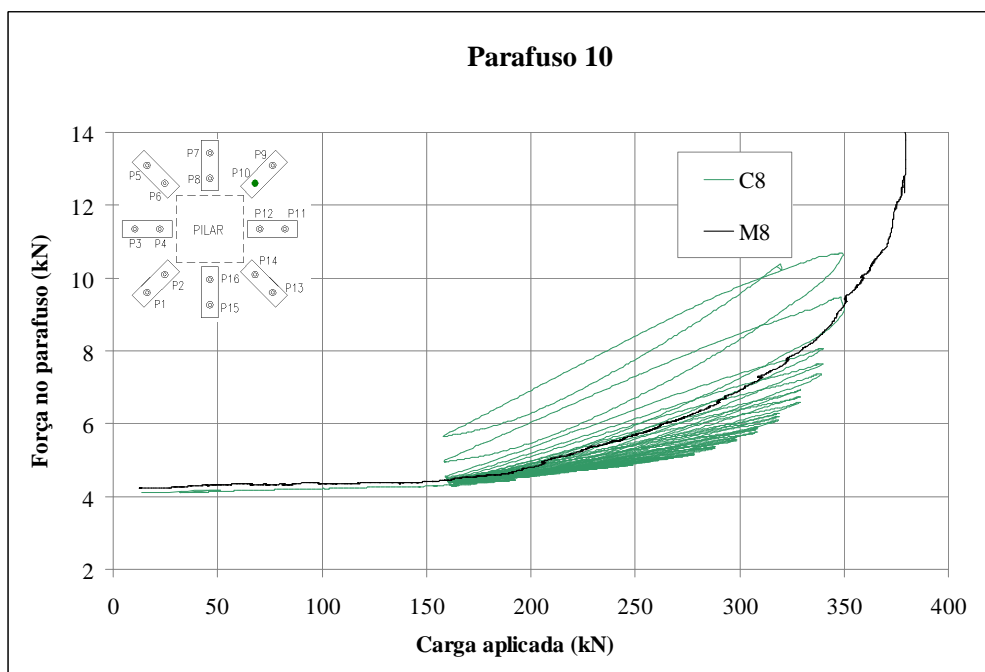


Figura 3.59 – Evolução da força no parafuso 10 dos modelos C8 e M8

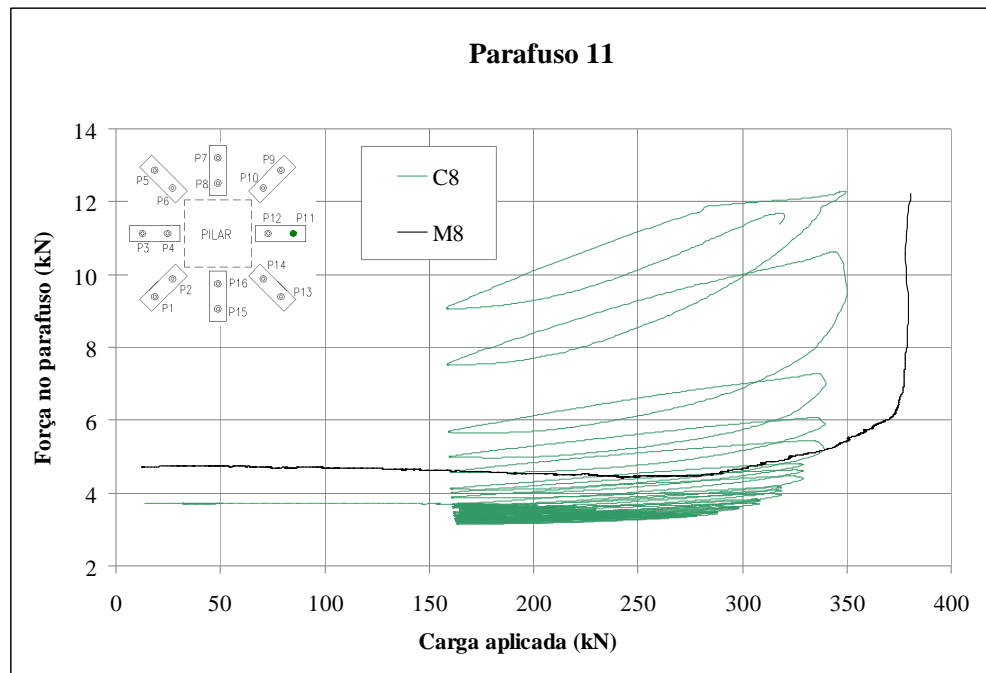


Figura 3.60 – Evolução da força no parafuso 11 dos modelos C8 e M8

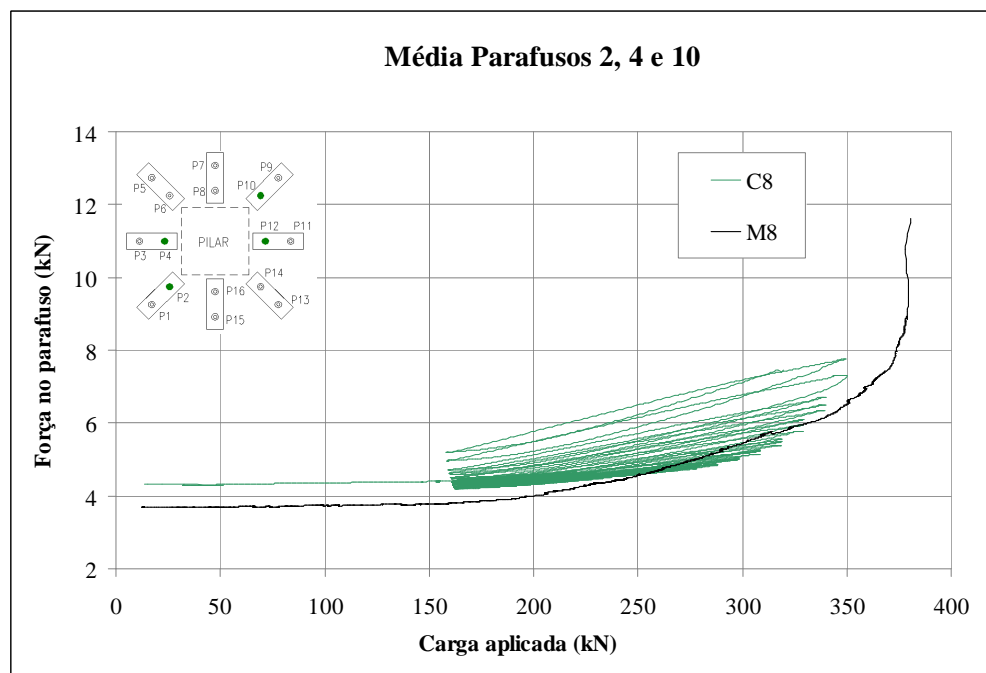


Figura 3.61 – Evolução da força média nos parafusos interiores (2, 4 e 10) dos modelos C8 e M8

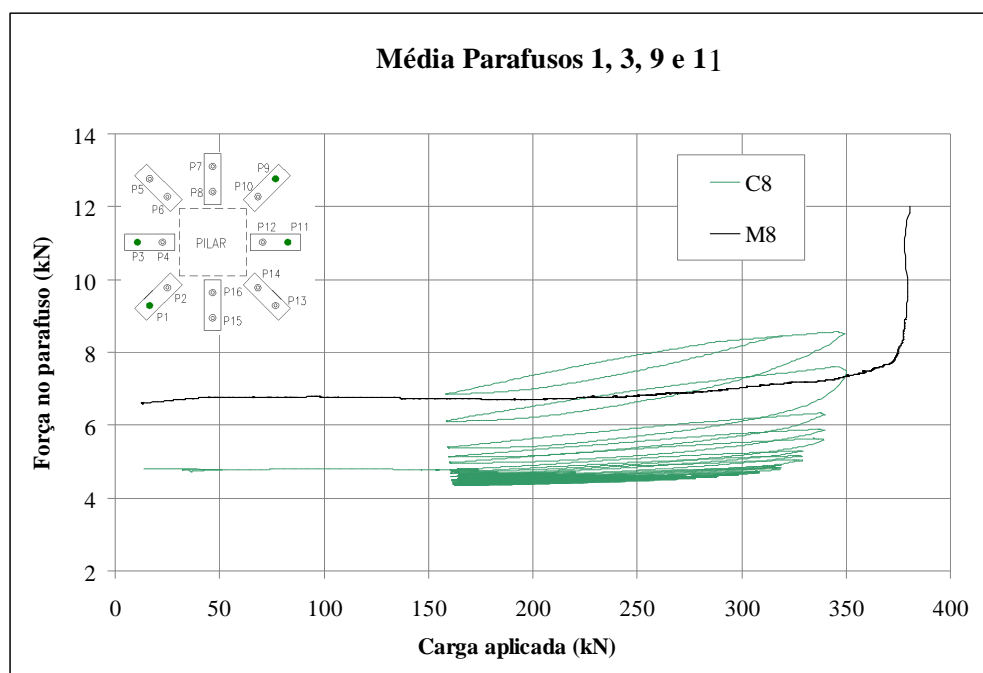


Figura 3.62 – Evolução da força média nos parafusos exteriores (1, 3, 9 e 11) dos modelos C8 e M8

No quadro seguinte faz-se um resumo das forças iniciais e finais de todos os parafusos instrumentados, dos modelos M8 e C8.

Quadro 3.10 – Resumo das forças iniciais e finais dos parafusos nos modelos M8 e C8

Parafuso		Modelo M8			Modelo C8		
		F_i (kN)	F_f (kN)	Variação	F_i (kN)	F_f (kN)	Variação
Exteriores	1	7.2	12.2	5.0	4.4	6.5	2.1
	3	6.4	13.0	6.6	5.3	5.0	-0.3
	9	8.1	10.7	2.6	5.8	10.9	5.1
	11	4.7	12.2	7.5	3.7	11.4	7.7
	Média	6.6	12.0	5.4	4.8	8.5	3.7
Interiores	2	4.9	15.8	10.9	3.9	6.3	2.4
	4	5.5	14.8	9.3	4.9	5.7	0.8
	10	4.2	15.8	11.6	4.1	10.3	6.2
	12	-	-	-	-	-	-
	Média	4.9	15.5	10.6	4.3	7.4	3.1

Mais uma vez, a força instalada nos parafusos manteve-se sensivelmente constante nos patamares iniciais do carregamento. No entanto, os parafusos colocados mais junto ao pilar começam mais cedo a ser solicitados. De facto para uma carga vertical de cerca de 200 kN no modelo M8, e de cerca de 250 kN no modelo C8, a força nos parafusos de reforço colocados na camada mais interior revela um incremento acentuado com o aumento da

carga vertical. Por outro lado este mesmo comportamento surge no parafuso da camada exterior para cargas de cerca de 300 kN no modelo C8 e 370 kN no modelo M8.

Nas Figuras 3.61 e 3.62 é visível que a envolvente das forças nos parafusos do modelo C8 tende a seguir o comportamento do das do modelo M8.

3.7.4 Comportamento na rotura

Verificou-se experimentalmente, em todos os modelos ensaiados, a rotura típica por punçoamento, ou seja, a formação de um tronco de pirâmide invertido que se destaca parcialmente da restante parte do modelo.

No modelo não reforçado, R (figura 3.63), a superfície desenvolve-se desde o perímetro do pilar na face em compressão até à face em tracção.

A rotura do modelo C6 (figura 3.64) deu-se pelo interior do reforço, intersectando a face em tracção entre as duas camadas de reforço em algumas zonas, e a camada exterior de parafusos de reforço noutras. Neste modelo todos os parafusos romperam à excepção de um deles da camada interior de parafusos de reforço. Comparando com a rotura obtida no modelo M6 pode-se concluir que foi semelhante diferindo apenas no numero de parafusos que atingiram a rotura, que para o modelo M6 (figura 3.65) foram onze (todos os da camada interior e três da camada exterior).

Para os modelos reforçados com parafusos de diâmetro 8 mm, C8 e M8 (figura 3.66 e figura 3.67 respectivamente), a superfície de rotura intersectou a face em compressão pelo exterior dos parafusos de reforço, sem se verificar a rotura de nenhum deles.



Figura 3.63 – Vista superior e inferior do modelo R (referência)

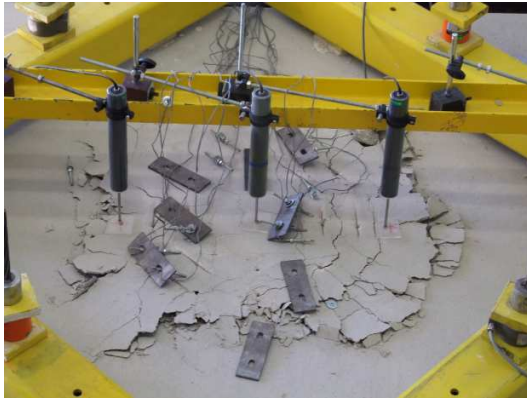


Figura 3.64 – Vista superior e inferior do modelo C6 após a rotura

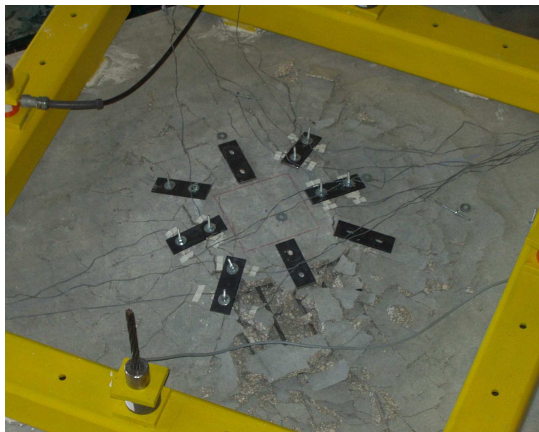


Figura 3.65 – Vista superior e inferior do modelo M6 após a rotura

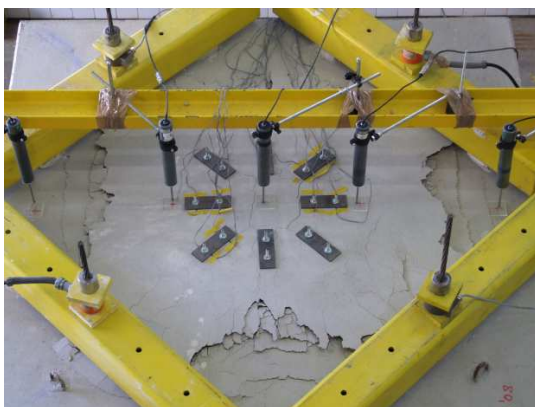


Figura 3.66 – Vista superior e inferior do modelo C8 após a rotura



Figura 3.67 – Vista superior e inferior do modelo C8 após a rotura



Figura 3.68 – Parafusos dos modelos C6 e M6, respectivamente, após a rotura

3.7.5 Cargas de rotura experimentais

Para melhor comparar os valores das cargas de rotura experimentais obtidos, independentemente da resistência do betão em cada modelo, calcularam-se os valores normalizados para a carga de rotura. Visto que segundo o EC2, V_{Rm} é função de $\sqrt[3]{f_{cm}}$, multiplicaram-se os valores das cargas de rotura experimentais obtidos por:

$$\sqrt[3]{\frac{f_{cm}}{f_{cm,i}}} = \sqrt[3]{\frac{42.7}{f_{cm,i}}} \quad (3.4)$$

onde:

$\overline{f_{cm}}$ – média das resistências à compressão do betão de todos os modelos;

$f_{cm,i}$ – resistência à compressão do respectivo modelo.

Quadro 3.11 – Valores experimentais normalizados

Modelo	f_{cm} (MPa)	V_{exp} (kN)	V_{norm} (kN)	V_{norm}/V_{ref}	Modo de rotura
R	39.3	269	277	1.00	Punçoamento
M6	47.7	331	319	1.15	Punçoamento
M8	47.7	381	367	1.33	Punçoamento
C6	39.4	337	346	1.25	Punçoamento
C8	39.4	349	358	1.30	Punçoamento

Obtiveram-se incrementos de resistência médios de cerca de 20% nos modelos reforçados com parafusos de 6mm de diâmetro, e de cerca de 32% no caso dos modelos reforçados com parafusos de 8mm de diâmetro.

O facto de o ensaio ser cíclico ou monotónico não permite tirar resultados conclusivos. Nos modelos com parafusos de 6mm, o modelo com carga cíclica apresentou um maior incremento na resistência, quando comparado com o modelo análogo sujeito a carregamento monotónico. O inverso acontece com os modelos que o reforço foi obtido com recurso a parafusos de 8mm.

3.7.6 Comparação das cargas de rotura experimentais com o previsto em alguns regulamentos

3.7.6.1 EC2

Segundo o EC2, o valor médio do esforço resistente ao punçoamento sem armaduras específicas é dado por:

$$V_{Rm,1} = 0.18 \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm})^{1/3} \times u \times d \quad (3.5)$$

onde:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (d \text{ em mm}) \quad (3.6)$$

$$\rho_l = \sqrt{\rho_x \times \rho_y} \leq 0.02 \quad (3.7)$$

$$u = 4 \times c + 4 \times \pi \times d \quad (3.8)$$

Os valores de ρ_x e ρ_y são calculados para uma largura igual à dimensão do pilar mais $3d$ para cada lado.

No caso de existirem armaduras específicas, o valor médio do esforço resistente ao punçoamento, sem a limitação da tensão nos parafusos do aço pode ser calculado do seguinte modo, segundo proposta de Duarte [2]:

$$V_{Rm,2} = 0.75 \times V_{Rm,1} + F_{p0.2} \times n^\circ \text{ parafusos} \quad (3.9)$$

Limitando a tensão do aço dos parafusos:

$$V_{Rm,2} = 0.75 \times V_{Rm,1} + A_{sw,b} \times f_{sy,ef} \times n^\circ \text{ parafusos} \quad (3.10)$$

em que:

$A_{sw,b}$ – área transversal do parafuso

$$f_{sy,ef} = (250 + 0.25 \times d) \times 1.15 < f_{sy} \quad (3.11)$$

Nas expressões 3.9 e 3.10 apenas são contabilizados os parafusos que se encontram no interior do perímetro de referência.

Caso a rotura ocorra pelo exterior do reforço, o valor médio do esforço resistente ao punçoamento é calculado através da seguinte expressão:

$$V_{Rm,3} = 0.18 \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{cm})^{1/3} \times u^* \times d \quad (3.12)$$

O perímetro u^* é definido a uma distância de $2d$ do perímetro definido pelas armaduras de reforço.

Quadro 3.12 – Resultados sem a limitação da tensão no aço dos parafusos e sem a limitação do k

	Modelo	k	ρ (%)	u (mm)	u^* (mm)	V_{Rm1} (kN)	V_{Rm2} (kN)	V_{Rm3} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
Monotônicos	R	2,51	1,20	1895,07	-	270,32	-	-	269	1,00
	M6	2,49	1,17	1925,26	2804,91	295,73	343,34	430,85	331	0,96
	M8	2,49	1,16	1934,40	2814,05	298,09	471,57	433,65	381	0,88
Cíclicos	C6	2,46	1,12	1975,96	2855,61	289,46	338,70	418,33	337	0,99
	C8	2,45	1,11	1987,27	2866,92	292,15	467,10	421,47	349	0,83

Quadro 3.13 – Resultados com a limitação da tensão no aço dos parafusos e sem a limitação do k

	Modelo	k	ρ (%)	u (mm)	u^* (mm)	V_{Rm1} (kN)	V_{Rm2} (kN)	V_{Rm3} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
Monotônicos	R	2,51	1,20	1895,07	-	270,32	-	-	269	1,00
	M6	2,49	1,17	1925,26	2804,91	295,73	305,03	430,85	331	1,09
	M8	2,49	1,16	1934,40	2814,05	298,09	365,47	433,65	381	1,04
Cíclicos	C6	2,46	1,12	1975,96	2855,61	289,46	300,62	418,33	337	1,12
	C8	2,45	1,11	1987,27	2866,92	292,15	361,64	421,47	349	0,97

Quadro 3.14 – Resultados com a limitação da tensão no aço dos parafusos e com a limitação do k

	Modelo	k	ρ (%)	u (mm)	u^* (mm)	V_{Rm1} (kN)	V_{Rm2} (kN)	V_{Rm3} (kN)	V_{exp} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
Monotónicos	R	2,00	1,20	1895,07	-	214,97	-	-	269	1,25
	M6	2,00	1,17	1925,26	2804,91	237,11	261,06	345,44	331	1,27
	M8	2,00	1,16	1934,40	2814,05	239,58	321,49	348,53	381	1,19
Cíclicos	C6	2,00	1,12	1975,96	2855,61	235,15	259,88	339,84	337	1,30
	C8	2,00	1,11	1987,27	2866,92	238,01	321,03	343,37	349	1,09

As previsões do EC2 para o valor médio da resistência ao punçoamento, sem limitação na tensão no aço dos parafusos de reforço e no valor do k, conduz a valores previstos ligeiramente contra a segurança. De facto o rácio V_{exp}/V_{Rm} é de 0.93, abaixo do valor óptimo de 1.00.

Quando passamos a considerar a limitação para a tensão no aço dos parafusos dada pela expressão (3.11), mas ainda sem a limitação do k, somos conduzidos a uma relação média entre os valores experimentais e os previstos de 1.04.

Finalmente considerando limites, tanto para a tensão no aço dos parafusos de reforço como para o valor do k, o mesmo rácio médio passa a ser de 1.22, ou seja, valores algo conservadores.

3.7.5.2 ACI 318 – 08

O ACI 318 – 08 define o valor médio da resistência ao punçoamento sem armadura específica (V_{Rm1}) como o menor valor resultante das seguintes expressões:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d}{6} \quad (3.13)$$

$$\left(\alpha_s \cdot \frac{d}{u} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d}{12} \quad (3.14)$$

$$\frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d \quad (3.15)$$

Onde β_c é o quociente entre o lado maior e o lado menor do pilar, α_s toma os valores de 40 para pilares interiores, 30 para pilares de bordo e 20 para pilares de canto. Neste regulamento o perímetro de contorno de referência u , é determinado a uma distância de $0.5d$ da face do pilar.

No caso de se adoptarem armaduras específicas de punçoamento, o ACI 318 – 08 apresenta a seguinte equação para o cálculo do esforço médio resistente ao punçoamento (V_{Rm2}):

$$V_{Rm2} = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u \cdot d + F_{p0,2} \cdot n^{\circ} \text{ parafusos} \quad (3.16)$$

Este regulamento define que em roturas pelo exterior do reforço, o valor médio da resistência ao punçoamento, V_{Rm3} é dado pelo valor mínimo resultante das expressões que se seguem:

$$\left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d}{6} \quad (3.17)$$

$$\left(\alpha_s \cdot \frac{d}{u} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d}{12} \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot u^* \cdot d \quad (3.19)$$

O perímetro de referência u^* é calculado a uma distância de $d/2$ do perímetro delimitado pelas armaduras de reforço.

Quadro 3.15 – Resultados obtidos com o ACI 318 – 08

	Modelo	V_{exp} (kN)	V_{Rm1} (kN)	V_{Rm2} (kN)	V_{Rm3} (kN)	V_{exp}/V_{Rm}
Monotónicos	R	269	196	-	-	1,37
	M6	331	-	241	419	1,37
	M8	381	-	369	425	1,03
Cíclicos	C6	337	-	237	408	1,42
	C8	349	-	364	414	0,96

Como se pode concluir da leitura do Quadro 3.15, o ACI – 318 é um regulamento algo conservador em especial para o modelo de referência e para os modelos em que o reforço foi feito com recurso a parafusos obtidos de varão roscado de 6 mm (M6 e C6). Nos modelos M8 e C8 a previsão para a carga de rotura segundo o ACI foi muito próxima da experimental. O rácio médio de V_{exp}/V_{Rm} foi de 1.23.

3.7.6.3 Resumo

Para mais fácil comparação dos resultados obtidos, apresenta-se na figura seguinte uma análise gráfica entre cargas de rotura experimentais e as previsões para o valor médio da resistência ao punçoamento usando o preconizado pelo EC2 e pelo ACI 318 – 08.

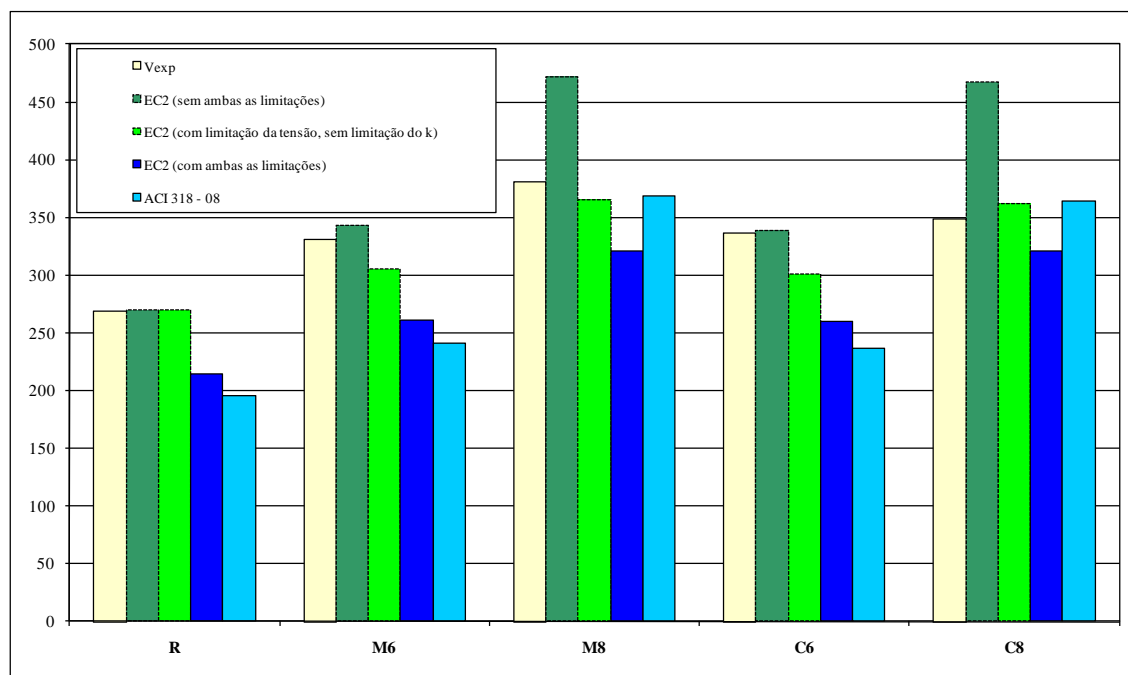


Figura 3.69 – Resumo da comparação entre os resultados experimentais, o EC2 e o ACI 318-08

Em termos gerais a melhor aproximação entre os resultados experimentais e os previstos é conseguida utilizando o EC2, considerando a limitação no aço dos parafusos de reforço dada pela expressão 3.11 e sem a limitação do factor de escala (k). Nesta situação a média do rácio V_{exp}/V_{Rm} é de 1.04, ligeiramente conservador (4% acima do valor óptimo de 1.00).

No quadro seguinte compara-se os resultados do modo de rotura previstos pelos regulamentos com os observados experimentalmente.

Quadro 3.16 – Modos de rotura previstos e experimentais

Modelo	Regulamento	Modo de rotura previsto	Modo de rotura experimental
M6	EC2 (sem limitações)	Interior ao reforço	Interior ao reforço
	EC2 (com limitação da tensão, sem limitação do k)	Interior ao reforço	
	EC2 (com limitações)	Interior ao reforço	
	ACI 318 - 08	Interior ao reforço	
M8	EC2 (sem limitações)	Exterior ao reforço	Exterior ao reforço
	EC2 (com limitação da tensão, sem limitação do k)	Interior ao reforço	
	EC2 (com limitações)	Interior ao reforço	
	ACI 318-08	Interior ao reforço	
C6	EC2 (sem limitações)	Interior ao reforço	Interior ao reforço
	EC2 (com limitação da tensão, sem limitação do k)	Interior ao reforço	
	EC2 (com limitações)	Interior ao reforço	
	ACI 318-08	Interior ao reforço	
C8	EC2 (sem limitações)	Exterior ao reforço	Exterior ao reforço
	EC2 (com limitação da tensão, sem limitação do k)	Interior ao reforço	
	EC2 (com limitações)	Interior ao reforço	
	ACI 318-08	Interior ao reforço	

Ambos os regulamentos prevêem correctamente o modo de rotura dos modelos reforçados com parafusos M6. No caso dos modelos C8 e M8 o ACI 318 – 08 não prevê correctamente o modo de rotura e o EC2 só o faz quando as limitações para a tensão no aço dos parafusos de reforço e para o k não são consideradas.

3.7.6 Inclinação das superfícies de rotura

Depois da realização dos ensaios, cortaram-se os modelos C6 e C8 pela linha média perpendicular à armadura longitudinal superior e fez-se o levantamento geométrico das inclinações da superfície de rotura nas duas metades do modelo. No caso dos modelos R,

M6 e M8 feito um levantamento geométrico após a remoção do betão pertencente ao cone de punçoamento.

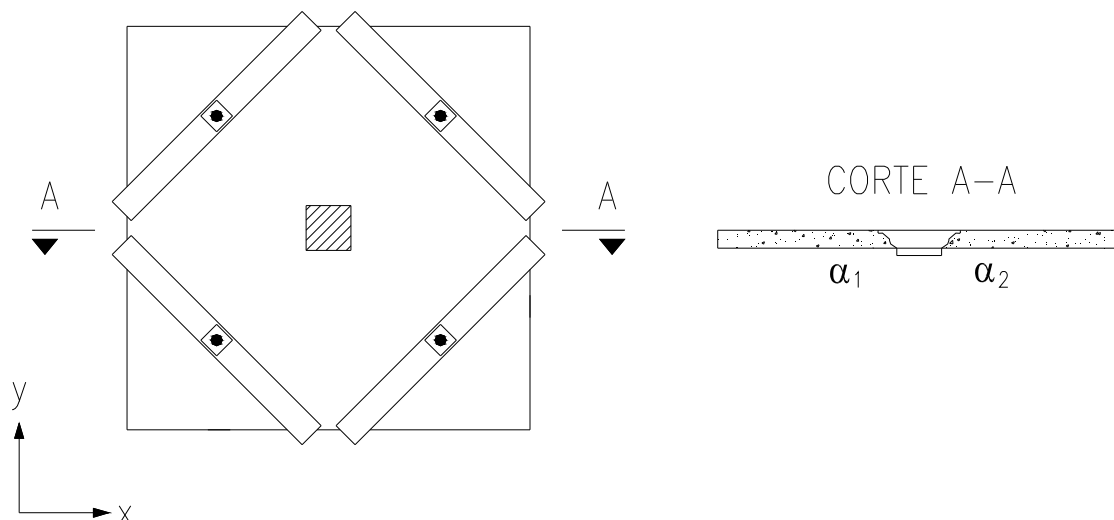


Figura 3.70 – Inclinações da superfície de rotura observadas

No quadro seguinte apresentam-se as inclinações da superfície de rotura com a horizontal registadas.

Quadro 3.17 – Inclinações da superfície de rotura com a horizontal

Modelo	$(\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ (°)
R	30
M6	40
M8	46
C6	39
C8	41

Da análise da tabela pode-se concluir que a introdução de parafusos de reforço originou um aumento da inclinação da superfície de rotura, tanto nos modelos com carregamento monotónico como cíclico. No entanto este aumento é mais acentuado no caso dos modelos com carregamento monotónico.

Nas figuras seguintes apresentam-se fotografias após corte dos modelos. As figuras evidenciam bem a rotura pelo interior do reforço do modelo C6 e a rotura pelo exterior do modelo C8. Nestas figuras, a localização dos parafusos está indicada pelo traço vermelho. Os modelos M6 e M8 obtiveram o mesmo tipo de rotura dos modelos homólogos, no

entanto, não foi possível apresentar fotografias dos mesmos, visto que não foram sujeitos a corte trasnsversal.



Figura 3.71 – Superfície de rotura do modelo C6 (2 metades)

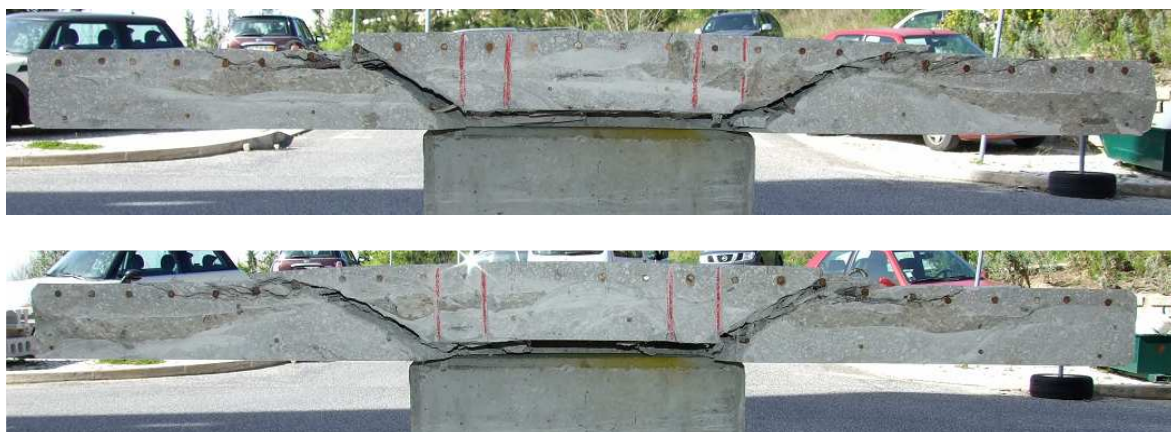


Figura 3.72 – Superfície de rotura do modelo C8 (2 metades)

Capítulo 4

Conclusões finais e desenvolvimentos futuros

4.1 Introdução

Descreveu-se neste trabalho os ensaios experimentais de modelos de lajes fungiformes reforçadas com parafusos verticais pré-esforçados. Verificou-se que esta técnica simples, económica e de rápida execução, aumenta significativamente a resistência das lajes ao punçoamento. Este aumento é visível tanto em lajes sujeitas a carregamentos monotónicos como em cíclicos.

Neste capítulo apresenta-se uma visão global das principais conclusões deste estudo experimental. Esta apresentação é feita em termos dos factores estudados:

- Extensões na armadura longitudinal superior;
- Deslocamentos verticais;
- Evolução da força nos parafusos de reforço;
- Cargas e modos de rotura ao punçoamento;
- Inclinação da superfície de rotura.

Na parte final deste capítulo apresentam-se algumas sugestões para continuar o estudo deste tema, contribuindo para o seu total esclarecimento.

4.2 Efeito do carregamento cíclico na resistência ao punçoamento de modelos reforçados com parafusos verticais pré-esforçados

São apresentadas aqui as principais conclusões do estudo experimental efectuado em 5 modelos de laje fungiforme, 4 deles reforçados com parafusos verticais pré-esforçados e 1 não reforçado, utilizado como referência. Evidenciam-se as principais alterações verificadas da variação do carregamento monotónico para o cíclico.

4.2.1 Extensões nas armaduras longitudinais superiores

Verificou-se, com a introdução dos parafusos de reforço, que as extensões nas armaduras longitudinais superiores diminuíram, tanto nos modelos com carregamentos cíclicos como nos monotónicos. A alteração do sistema de carregamento de monotónico para cíclico não originou diferenças significativas nesta grandeza. As distribuições transversais de extensões são, em geral, as expectáveis, com valores mais elevados nos varões mais próximos do pilar.

4.2.2 Deslocamentos verticais

Verificou-se experimentalmente que a introdução dos parafusos de reforço originou um incremento da rigidez dos modelos. De facto, comparando o modelo de referência com os restantes modelos reforçados, observou-se que nestes os deslocamentos verticais são inferiores, para patamares de carga homólogos.

Observou-se ainda valores inferiores dos deslocamentos verticais nos modelos reforçados com parafusos M8 (modelos M8 e C8) quando comparados com os obtidos nos modelos em que o reforço foi obtido com a utilização de parafusos M6 (modelos M6 e C6). O aumento do diâmetro dos parafusos de reforço deu origem assim a um incremento de rigidez da laje.

As deformadas apresentadas indicam que as rotações concentram-se sobretudo junto ao pilar. Nas restantes zonas a deformada é mais ou menos linear.

4.2.3 Evolução da força nos parafusos de reforço

A força instalada nos parafusos manteve-se sensivelmente constante nos patamares iniciais do carregamento, tendo-se registado incrementos acentuados da mesma nos patamares que antecedem a rotura por punçoamento.

Nos modelos C6 e M6 os parafusos colocados na camada mais junto ao pilar apresentaram uma força superior às dos parafusos colocados na camada mais exterior.

Nos modelos reforçados com parafusos M6 (C6 e M6) vários parafusos romperam (15 no modelo C6 e 11 no modelo M6). Nos modelos reforçados com parafusos de diâmetro de 8 mm (C8 e M8) não se verificou a rotura de nenhum deles.

4.2.4 Cargas e modos de rotura ao punçoamento

Todos os modelos ensaiados apresentaram rotura por punçoamento. Nos modelos C6 e M6 a rotura deu-se pelo reforço. Nos modelos C8 e M8 a superfície de rotura foi exterior ao reforço, tendo intersectado a face em compressão fora da área da laje que continha os parafusos de reforço.

Verificou-se experimentalmente o incremento de resistência originado pelo reforço da laje com parafusos verticais. Em média este foi de 20% nos modelos reforçados com parafusos de 6 mm de diâmetro e de cerca de 32% nos reforçados com os parafusos de 8 mm de diâmetro. A existência de carregamento de tipo diferente (monotónico ou cíclico) não levou a uma tendência clara, em termos de carga de rotura.

Os valores previstos para o valor médio do esforço resistente ao punçoamento utilizando o EC2, com as limitações que ele recomenda leva a valores algo conservadores (média V_{exp}/V_{Rm} de 1.22). Por outro lado se só for considerada a limitação para a tensão no aço dos parafusos de reforço, as previsões segundo o EC2 tornam-se muito próximas dos valores experimentais (média V_{exp}/V_{Rm} de 1.04).

Por outro lado as previsões das cargas de rotura segundo o ACI 318 – 08 são algo conservadoras.

4.2.5 Inclinação da superfície de rotura

A introdução dos parafusos de reforço aumentou a inclinação da superfície de rotura com a horizontal. Este aumento verifica-se tanto nos modelos ensaiados monotonicamente como nos ensaiados ciclicamente. No entanto, este aumento é mais acentuado nos modelos com carregamento monotónico (M6 e M8).

4.3 Desenvolvimentos futuros

Após a conclusão deste estudo experimental espera-se ter contribuído para o aumento do conhecimento deste tema, no entanto existem ainda muitas variáveis por estudar para permitir o completo conhecimento desta técnica de reforço.

Relativamente ao reforço de lajes fungiformes ao punçoamento com parafusos seria interessante continuar com a investigação e a realização de ensaios experimentais com o objectivo de esclarecer os seguintes aspectos:

- O efeito da variação do pré-esforço na resistência e modo de rotura;
- O efeito da dimensão em planta e espessura das placas de ancoragem;
- A influência da injeção com resina epoxi ou outro material semelhante no espaço vazio entre os parafusos e a laje, estudando as alterações induzidas através da aderência entre os parafusos e a laje;
- A utilização desta técnica de reforço de lajes fungiformes junto a pilares de bordo e de canto;
- Estudo da relação entre o vão e a espessura da laje, pois a utilização de relações l/h diferentes origina relações entre momentos flectores e esforço de corte actuante diferentes;
- Seria interessante considerar uma variação da percentagem geométrica da armadura longitudinal, pois neste estudo foi utilizada sempre a mesma quantidade;
- Estudo do efeito das dimensões e forma do pilar na resistência ao punçoamento;
- Desenvolvimento de estudos analíticos e numéricos mais eficazes e viáveis para determinação da resistência de lajes fungiformes ao punçoamento;
- Aplicação desta técnica de reforço a lajes fungiformes aligeiradas.

Referências

- [1] ACI Committee 318. 318M-08 Metric Building Code Requirements for Structural Concrete & Commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, 2008, 436 pp.
- [2] Duarte, I.: “*Comportamento ao Punçoamento de Lajes Fungiformes Reforçadas com Parafusos*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [3] Duarte, I., Ramos, A. e Lúcio, V.: “*Strengthening of Flat Slabs with Transverse Reinforcement*”, Proceedings of CCC2008 – Challenges of Civil Construction International Conference (in CD), Abril, 2008, Porto, Portugal.
- [4] El-Salakawy, E.; Soudki, K.; Polak, M. A.: “*Punching Shear Behavior of Flat Slabs Strengthened with Fiber Reinforced Polymer Laminates*”, Journal of Composites for Construction, ASCE/September/October, 2004.
- [5] EN Comité Euro-International du Béton: *CEB-FIP Model Code 1990*, Bulletin d’information n° 213-214, Maio, 1993.
- [6] EN 1992-1-1: 2004, “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”.
- [7] Folhas de apoio às aulas de Betão armado e pré-esforçado 2, IST, 2005.
- [8] Gardner, N.; Jungsuck, H. e Chung, L.: “What can we learn from the Sampoong Department Store Collapse”, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Flat Slabs, Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Estocolmo, Julho, 2000.
- [9] Ghali, A.; Sargious, M. A.; Huizer, A.: “*Vertical Prestressing of Flat Slabs Around Columns*”, Shear in Reinforced Concrete, ACI, Special Publication SP 42, 1974, Detroit, Vol. 2, 905-920.

- [10] Harajli, M. H.; Soudki, K. A.; Kudsi, T.: “*Strengthening of Interior Slab-Column Connections Using a Combination of FRP sheets and Steel Bolts*”, Journal of Composites for Construction, ASCE/September/October, 2006.
- [11] IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 10002-1. Materiais metálicos. Ensaio de tracção – Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente, Lisboa, 2006.
- [12] IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 12390-1 - Ensaio do betão endurecido – Forma, dimensões e outros requisitos para o ensaio de provetes e para os moldes, Lisboa, 2003.
- [13] IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 12390-2 – Ensaio do betão endurecido – Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência, Lisboa, 2003.
- [14] IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 12390-3 – Ensaio do betão endurecido – Resistência à compressão dos provetes de ensaio, Lisboa, 2003.
- [15] Kunz, J.: “*Refuerzo de techos planos*”, The magazine of the Hilti group, 1/2007, Julho, 2007, Liechtenstein.
- [16] Menétrey, P.: “*Analytical Computation of the Punching Strength of Reinforced Concrete*”, ACI Structural Journal, Vol. 93, Detroit, EUA, 1996, p. 503-511.
- [17] Menétrey, P.; Bruhwiler E.: “*Shear strengthening of existing reinforced concrete slabs under concentrated loads*”, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, 1996.
- [18] Ramos, A.: “*Reparação e Reforço de Lajes Fungiformes ao Punçoamento*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 1995, 37-63.
- [19] Ramos, A. e Lúcio, V.: “*Análise Experimental de Técnicas de Reparação e Reforço ao Punçoamento*”, 5º Encontro Nacional sobre Estruturas Pré-Esforçadas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Novembro, 1994.
- [20] Ramos, A. e Lúcio, V.: “*Técnicas de Reparação e Reforço ao Punçoamento de Lajes Fungiformes*”, Documento Técnico nº 4/96, Instituto da Construção, Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Novembro, 1996.

- [21] Ramos, A.; Lúcio, V. e Regan, P.: “*Repair and strengthening Methods of Flat Slabs for Punching*”, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Flat Slabs, Royal Institute of Technology, Department of Structural Engineering, Estocolmo, Julho, 2000.
- [22] REBAP: Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Lopes da Silva Editora, Porto, 1984.
- [23] Wood, J.: “*Piper Row Car Park, Wolverhampton, Quantitative Study of the Causes of the Partial Collapse on 20th March 1997*”, Health and Safety Executive Report, Reino Unido, Maio, 2008.